1. Определение диапазона сверхвысоких частот. Свойства и особенности электромагнитных колебаний диапазона СВЧ

Согласно рекомендациям Международного консультативного комитета по радио весь спектр электромагнитных колебаний делится на ряд диапазонов, каждый из которых находится в пределах $(0{,}3..3)\cdot 10^{N}$ Гц, где N – порядковый номер диапазона. К сверхвысоким частотам принято относить частоты 9, 10, 11, 12 – диапазонов.

Эти диапазоны имеют следующие названия и частотные границы:

N=9 ультравысокие частоты (УВЧ, UHF) 0,3..3 ГГц;

N=10 сверхвысокие частоты (СВЧ, SHF) 3..30 ГГц;

N=11 крайне высокие частоты (КВЧ, EHF) 30..300 ГГц;

N=12 гипервысокие частоты (ГВЧ, HHF) 300..3000 ГГц.

Граничным частотам приведенных диапазонов соответствуют определенные значения длин волн, которые можно определить по формуле $\lambda = c/f = 30/f$, где λ – длина волны, см; c – скорость распространения света; f – частота, ГГц. Если определять диапазоны не частотами, а длинами волн, то диапазон УВЧ может быть назван дециметровым диапазоном (ДМВ) λ = 10..1 дм; СВЧ – сантиметровым (СМВ), λ = 10..1 см; КВЧ – миллиметровым (ММВ), λ = 10..1 мм, а ГВЧ – децимиллиметровым (ДМ), λ = 1..0,1 мм. Электромагнитные колебания СВЧ диапазона обладают рядом важных физических особенностей. Рассмотрим некоторые из них.

В диапазоне СВЧ существует возможность создания узконаправленного излучения при сравнительно небольших геометрических размерах антенн. Это позволяет осуществлять направленную передачу сигналов, достоинством которой являются снижение взаимных помех, увеличение дальности действия радиосистем, скрытность передачи, высокая точность радиолокационного определения координат объектов и др. Огромная ширина диапазона СВЧ позволяет разместить в нем большое число каналов связи, использовать широкополосные помехоустойчивые виды модуляции. Это дает возможность осуществлять высококачественную передачу телефонных и телевизионных сигналов, передавать с большой скоростью цифровую информацию компьютерных сетей. СВЧ колебания хорошо поглощаются многими диэлектрическими материалами, парами воды. На этом свойстве СВЧ энергии основаны СВЧ нагрев и сушка материалов, использование СВЧ энергии в пищевой промышленности, быту, с целью ускоренного приготовления пищи, пастеризации, стерилизации и обезвоживания пищевых продуктов. Волны СВЧ диапазона применяются их в медицине для прогрева тканей организма (диатермия), в фармакологической технологии. СВЧ колебания могут оказывать специфическое воздействие на процессы в живых клетках, что также используется в медицине и для биологических исследований. Некоторые физические особенности колебаний диапазона СВЧ, обеспечивающие их широкое применение в различных областях науки и техники, создают определенные трудности при создании СВЧ устройств и приборов. В диапазоне СВЧ длина волны становится соизмеримой с размерами элементов цепей, что приводит к обычно не контролируемым излучениям элементов схем, создающих нежелательные связи между элементами и увеличивающих потери энергии за счет излучения. Увеличение частоты колебаний приводит к росту потерь в диэлектрических материалах, используемых в конструкции СВЧ устройств. Для уменьшения потерь энергии в диапазоне СВЧ используют специальные изоляционные материалы с малыми потерями, а также уменьшают активное сопротивление проводников с помощью увеличения их поверхности, улучшения чистоты обработки поверхности проводников, применения покрытий материалами с низкой удельной проводимостью (серебро, золото).

2. Классификация приборов СВЧ

Приборы СВЧ предназначены для усиления, генерирования и преобразования частоты электромагнитных колебаний СВЧ диапазона. С принципиальной точки зрения процессы генерирования и усиления заключаются в преобразовании энергии источника питания в энергию электромагнитных колебаний. В зависимости от способа преобразования энергии различают электронные приборы СВЧ и квантовые приборы. В электронных приборах СВЧ происходит преобразование электрической энергии источников постоянного или импульсного напряжения в энергию СВЧ колебаний при помощи потока свободных электронов, выполняющих роль посредника при передаче энергии, полученной от источника питания, электромагнитным колебаниям СВЧ. Передача энергии осуществляется в процессе движения электронов против сил торможения, создаваемых переменным электрическим СВЧ полем, связанным с колебательной системой. В квантовых приборах в энергию электромагнитных колебаний СВЧ преобразуется внутренняя энергия атомов (ионов, молекул). Электроны, участвующие в процессе преобразования энергии, остаются связанными со своими атомами. Передача энергии от источника питания происходит в результате изменения квантовых состояний того или иного ансамбля частиц, входящих в состав вещества. В квантовых приборах в энергию электромагнитных колебаний СВЧ преобразуется внутренняя энергия атомов (ионов, молекул). Электроны, участвующие в процессе преобразования энергии, остаются связанными со своими атомами. Передача энергии от источника питания происходит в результате изменения квантовых состояний того или иного ансамбля частиц, входящих в состав вещества. По характеру энергообмена ЭВП СВЧ могут быть разделены на приборы типов О и М. Приборы СВЧ О-типа – это приборы, в которых происходит преобразование кинетической энергии электронов в энергию СВЧ поля в результате торможения электронов этим полем. В приборах М-типа (магнетронного типа), которые еще также называются приборами со скрещенными полями, так как в таких приборах движение электронов происходит во взаимно перпендикулярных (скрещенных) статических электрическом и магнитном полях. По длительности взаимодействия электронов с полем СВЧ ЭВП СВЧ подразделяются на приборы с кратковременным (прерывистым) взаимодействием и приборы с длительным (непрерывным) взаимодействием.

Приборы с кратковременным взаимодействием одновременно являются приборами О-типа. Приборы с длительным взаимодействием могут быть как типа О, так и типа М. По виду управления электронным потоком ЭВП СВЧ подразделяются на приборы с электростатическим и динамическим управлением. Квантовые приборы удобно разделить на две группы в соответствии с диапазоном рабочих частот. Квантовые приборы в оптическом диапазоне получили название оптических квантовых генераторов (ОКГ).

3. Характеристики и параметры приборов СВЧ

Система параметров СВЧ состоит из большого количества основных и дополнительных электрических параметров, а также параметров режима эксплуатации. Основными параметрами генераторных приборов СВЧ являются: Выходная мощность - минимальное значение мощности (непрерывной или импульсной) $P_{вых}$, выделяемой на согласованной нагрузке в рабочем диапазоне частот. По величине выходной мощности генераторы СВЧ подразделяются на генераторы малой мощности $P_{вых} < 1$ Вт, генераторы средней мощности $P_{вых} = 1..100$ Вт, генераторы большой мощности $P_{вых} > 100$ Вт. В общем случае выходная

мощность генераторов СВЧ уменьшается с увеличением частот генерируемых колебаний. Коэффициент полезного действия (КПД): определяется, как отношение выходной мощности прибора к мощности, потребляемой от источников питания P. Величина КПД имеет огромное значение для приборов большой выходной мощности, определяя эффективность применения прибора, а также возможность его осуществления. Рабочий диапазон частот – интервал частот, в котором прибор обеспечивает выходную мощность и другие параметры не хуже величин, указанных в технической документации и гарантируемых заводом-изготовителем. Диапазон перестройки частот. Перестройка частоты в генераторных приборах СВЧ может осуществляться механическим и электрическим путем. Диапазоном перестройки частоты считают интервал частот, в котором параметры генератора сохраняются в заданных пределах при его перестройке органами механической перестройки $\Delta f_м$ или управляющими сигналами электрической перестройки $\Delta f_{эл}$. Для очень широких диапазонов перестройки частоты удобнее пользоваться коэффициентом перекрытия диапазона $\delta_п = f_{макс}/f_{мин}$. Спектральная плотность шумов характеризует стабильность амплитуды и частоты колебаний генератора СВЧ, изменяющихся под действием внутренних и внешних дестабилизирующих факторов. Кратковременная нестабильность колебаний проявляется в виде быстрых изменений мощности и частоты генератора относительно средних значений. Уровень амплитудных шумов генератора оценивают относительной спектральной плотностью амплитудных шумов: $N_{ш\,ам} = 10\lg(P_{ш\,ам}/P_о)$ [дБ/Гц]. Коэффициент усиления по мощности $К_р$, который обычно выражается в децибелах и определяется соотношением

$К_р = 10\lg(P_{вых}/P_{вх})$ [дБ]. Величина коэффициента усиления зависит от величины входной мощности, частоты сигнала, электрического режима прибора и некоторых других факторов. Полоса пропускания - это интервал частот Δf в котором коэффициент усиления снижается не более, чем на 3 дБ от своего максимального значения. Коэффициент шума показывает, во сколько раз отношение мощностей сигнала и шума на выходе усилителя меньше этого же отношения на его входе, т.е. $K_Ш = \frac{P_{вх}/P_{ш\,вх}}{P_{вых}/P_{ш\,вых}}$. Очевидно, что коэффициент идеального усилителя равен 1. Коэффициент шума выражают в относительных единицах или децибелах:

$К_ш$ (дБ) $= 10\lg(К_ш)$. Динамический диапазон определяется как отношение максимальной

входной мощности линейного режима к мощности собственных шумов усилителя в определенной полосе частот, т.е. $D = 10\lg P_{макс}/(4\times10^{-15}\Delta f\ К_ш)$ [дБ]. Параметры режима эксплуатации приборов СВЧ определяют требования к величине питающих напряжений и их стабильности, климатическим и механическим условиям работы приборов. Специфика применений приборов СВЧ накладывает ограничения на габариты и вес приборов, при этом определяющим параметром является отношение удельной массы на единицу мощности, кг/Вт. Для лучших электровакуумных приборов СВЧ этот параметр соответствует 0,01 кг/Вт. Исключительно важным требованием является срок службы приборов СВЧ и их надежность. Срок службы приборов СВЧ, предназначенных для использования на космических объектах связи, обычно превышает 200000 часов.

4. Особенности работы и конструкции электронных ламп со статическим управлением электронным потоком в диапазоне СВЧ. Влияние инерционных свойств электронного потока на работу электронных ламп

Статическое (сеточное) управление электронным потоком используется в обычных электронных лампах (триодах, тетродах и т.д.). При статическом управлении плотность электронного потока меняется под действием переменного напряжения на управляющей сетке лампы, которое определяет количество электронов, уходящих из прикатодной области, т.е. катодный ток лампы. При этом сетка, находясь под отрицательным потенциалом, не перехватывает электроны, т.е. управление током не требует затраты мощности в сеточной цепи. С увеличением рабочей частоты работа электронных ламп ухудшается: резко снижается выходная мощность, падает коэффициент усиления, возрастает склонность к самовозбуждению и т.п. С увеличением частоты происходит возрастание индуктивного сопротивления X_L выводов лампы и емкостной проводимости B_c междуэлектродных зазоров ($X_L = \omega L$, а $B_c = \omega C$). Это приводит к уменьшению напряжения входного сигнала на управляющей сетке и напряжения на нагрузке лампы, так как нагрузка шунтируется емкостной проводимостью зазора анод-катод. Величина проходной емкости Сас определяет величину предельного коэффициента устойчивого усиления на электронной лампе: $K \approx 0.42\sqrt{S/(\omega C_{ac})}$, где S- крутизна лампы. Междуэлектродные емкости и индуктивности выводов изменяют параметры колебательных систем, подключенных к лампе, в результате уменьшается собственная частота этих колебательных систем, становится невозможной настройка их на частоту выше некоторой предельной. Вследствие скин-эффекта с ростом частоты возрастают активные потери в выводах ламп, увеличиваются также диэлектрические потери и потери на излучение. Вследствие того, что электроны имеют массу, они не могут мгновенно пролетать расстояние между электродами лампы. При значительном увеличении частоты время пролета электронов в промежутке между электродами может оказаться сравнимым с периодом переменного напряжения T и больше его. В этом случае напряжение между электродами за время пролета электрона сильно изменится, что вызывает отставание по фазе тока от напряжения. Для сравнения времени пролета t с периодом T используют понятие угла пролета: $Q = 2\pi\tau/T = 2\pi f\tau = \omega\tau$ (радиан). Угол пролета показывает изменение фазы переменного напряжения, приложенного к электродам, за время пролета электронами между этими электродами. Полный ток во внешней цепи представляет собой сумму наведенного и емкостного токов во внешней цепи: $i_{\text{п}}(t) = i_{\text{н}}(t) + i_{\text{емк}}(t)$, где $i_{\text{емк}}(t) = C\frac{du}{dt}$ - наведенный ток, обусловленный движением всех зарядов, находящихся в междуэлектродном промежутке. Эффективность работы можно повысить, уменьшив пролетные углы, междуэлектродные емкости, индуктивности выводов, снизив диэлектрические потери в электродах лампы. Очевидным путем уменьшения пролетных углов является сближение электродов и повышение напряжений на них. Однако уменьшение междуэлектродных расстояний приводит к нежелательному увеличению междуэлектродных емкостей. Это обстоятельство заставляет значительно уменьшать площади электродов, что приводит к уменьшению средней мощности ламп. Индуктивности выводов могут быть значительно уменьшены при использовании массивных дисковых выводов, сочленяемых непосредственно с колебательными контурами, выполненными в виде отрезков коаксиальных линий. Это позволяет одновременно уменьшить потери на излучение. Рассмотренные конструктивные меры используются в лампах диапазона СВЧ, называемых металлокерамическими. В диапазоне СВЧ используются триоды и тетроды, включаемые в схему с общей сеткой. Металлокерамические триоды могут работать на частотах до 10 ГГц, однако выходная мощность и КПД имеют на этих частотах небольшое значение. Основное применение получили мощные триоды с принудительным охлаждением, работающие в длинноволновой части диапазона дециметровых волн. Получили распространение тетроды, у которых резонансные системы располагаются в вакуумной оболочке лампы, так называемые резнатроны (резонансные тетроды). Резнатроны используются для генерирования больших мощностей, достигающих сотен киловатт в дециметровом диапазоне. Низкий коэффициент усиления является главным недостатком всех СВЧ электронных приборов с электростатическим управлением электронным потоком. Триоды и тетроды СВЧ используются в выходных каскадах радиолокационных и телевизионных передатчиков дециметрового диапазона. Важным достоинством СВЧ триодов и тетродов являются сравнительно малые масса и габариты, низкие питающие напряжения.

5. Особенности электронных приборов СВЧ с динамическим управлением электронным потоком. Общий принцип действия электровакуумных приборов СВЧ О-типа

Инерция электронов является основной причиной резкого снижения выходной мощности ЭВП СВЧ со статическим управлением при увеличении рабочей частоты. Значительное увеличение рабочей частоты и выходной мощности достигается в ЭВП СВЧ специальной конструкции, в которых полезно используется время пролета электронов. Создание таких приборов оказалось возможным в результате применения метода динамического управления электронным потоком. Сущность метода динамического управления электронным потоком сводится к тому, что на постоянный по плотности ускоренный электронный поток воздействуют СВЧ полем, которое изменяет во времени по периодическому закону скорость

электронов. При дальнейшем движении электроны вследствие разницы в скоростях изменяют свое взаимное положение так, что при определенных условиях в электронном потоке происходит образование областей с повышенной плотностью (сгустков). Далее обеспечивают передачу энергию от сгустков электронного потока внешней колебательной системе. Другими словами, метод динамического управления сводится к модуляции электронного потока по скорости, превращению модуляции по скорости в модуляцию по

плотности и передаче энергии от электронного потока в колебательную систему. При динамическом управлении время пролета электронов имеет решающее значение, так как только в процессе длительного движения электронов возможно группирование их в сгустки. Модуляцию электронного потока по скорости осуществляют СВЧ колебаниями, которые необходимо усилить, или для этого используют часть энергии, отводимой в модулирующее устройство через цепь обратной связи (в генераторах). Превращение модуляции по скорости в модуляцию по плотности осуществляют в процессе движения электронов в пространстве взаимодействия с СВЧ полем, либо в тормозящем электростатическом поле, либо в пространстве свободном от полей. Преобразование энергии сгруппированного ускоренного потока электронов в энергию СВЧ колебаний происходит в результате торможения сгустков в переменном электрическом поле колебательной системы. ЭВП СВЧ с динамическим управлением делятся на две группы:

1. Приборы с кратковременным (дискретным) взаимодействием электронов с электромагнитным полем.
2. Приборы с длительным (распределенным) взаимодействием.

В приборах с кратковременным взаимодействием модуляция электронов по скорости и группирование электронов разнесены в пространстве и во времени. В приборах второй группы модуляция электронов по скорости и группирование электронов происходит при совместном движении электронов и поля бегущей волны на всем пути их движения.

ЭВП СВЧ представляют собой наиболее обширную группу СВЧ приборов, действие которых основано на использовании свойств потока свободных электронов, движущихся в условиях вакуума при давлении $P = 10^{-6}$ мм рт.ст. ЭВП СВЧ способны усиливать и генерировать сигналы во всем диапазоне СВЧ при уровне мощности от весьма малых до исключительно больших значений. Группирование электронного потока по плотности является необходимым условием для преобразования энергии электронов в энергию колебаний СВЧ во всех видах ЭВП СВЧ и во многом определяет эффективность самого преобразования. При однородном электронном потоке в тормозящие и ускоряющие фазы переменного электрического поля колебательной системы будет попадать одинаковое количество электронов, что приведет в среднем к нулевому энергообмену. Для достижения эффекта передачи энергии электронов колебательной системе необходимо обеспечить повышенную концентрацию электронов в тормозящей фазе поля, т. е. группирование электронов. Во всех приборах этап торможения электронов не может предшествовать этапу ускорения, так как отобрать энергию можно лишь в том случае, если она у электронов уже есть. ЭВП СВЧ, в которых происходит преобразование кинетической энергии ускоренных электронов в энергию колебаний СВЧ, называются приборами О-типа. В таких приборах этапы преобразования кинетической энергии электронов в энергию колебаний СВЧ происходят при прямолинейном движении электронов в междуэлектродных промежутках, расположенных внутри вакуумной оболочки прибора, при этом порядок расположения промежутков может быть различным у разных видов ЭВП СВЧ.

6. Узкополосные колебательные системы электровакуумных приборов СВЧ

К узкополосным колебательным системам относятся замкнутые вибраторы (эндовибраторы) различных форм, резонаторы типа щель – отверстие, а также короткозамкнутые отрезки коаксиальных линий и волноводов. Развитие и широкое применение колебательных систем этих видов связано с началом освоения радиотехникой в 30-х годах дециметрового и сантиметрового диапазонов радиоволн. Наиболее широкое применение в электронике СВЧ нашли колебательные системы, в которых электрическое и магнитное поля как бы отделены в пространстве друг от друга. В этих колебательных системах части плоскостей, расположенные на небольшом расстояние друг от друга, образуют емкость, в которой сосредоточено электрическое поле. В остальной части объема, эквивалентной индуктивности контура, сосредоточено, в основном магнитное поле. Концентрация высокочастотного электрического поля в небольшой части пространства имеет весьма важное значение, так как передача энергии от электронного потока в колебательную систему происходит во многих приборах в результате взаимодействия движущихся электронов с переменным электрическим полем. Колебательные контуры, составленные из сосредоточенных элементов L и C, характеризуются емкостью, индуктивностью, связанной с этими величинами резонансной частотой $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и добротностью. В колебательных системах СВЧ диапазона невозможно полностью разграничить индуктивность и емкость. Для коаксиальных или волноводных линий передачи иногда пользуются понятиями погонной индуктивности и погонной емкости, т. е. величинами L и C, приходящимися на единицу длины. Колебательные системы СВЧ диапазона обычно характеризуют тремя величинами, резонансной частотой при основном виде колебаний, добротностью и эквивалентной проводимостью. В замкнутых колебательных системах может возникнуть множество различных колебаний, отличающихся частотой и соответственно распределением электрического и магнитного полей внутри объема резонатора. Но, как правило, наибольшей интенсивностью характеризуется один из простейших видов колебаний, для которого граничные условия удовлетворяются наилучшим образом. Так, например, для резонатора, образованного отрезком коаксиальной линии с емкостью в торцевой части, основным видом колебаний будет такой, когда вдоль линии укладывается четверть волны. Добротность замкнутых колебательных систем весьма высока (порядка сотен и тысяч единиц), так как электромагнитное поле заключено внутри оболочки, образующей резонатор. Сама оболочка, металлическая или металлизированная внутри, служит экраном, и потери на излучение практически отсутствуют. Потери в самом резонаторе невелики, так как форму резонатора стараются сделать такой, чтобы в местах пучности тока периметр поверхности, обтекаемой этим током, был как можно меньше. Кроме того, внутреннюю поверхность покрывают обычно тонким слоем металла с малым удельным сопротивлением (серебро или золото) и затем полируют для уменьшения микроскопических неровностей и сокращения пути тока. Потери в самом резонаторе часто характеризуют эквивалентной проводимостью потерь $G_{\text{п}} = \frac{2P_{\text{п}}}{{U_{\text{м}}}^2}$, где $P_{\text{п}}$- мощность, теряемая в резонаторе;$U_{\text{м}}$- амплитуда высокочастотного напряжения. Если резонатор нагружен, т. е. часть электромагнитной энергии отводится из резонатора в нагрузку, то пользуются понятием проводимости нагруженного резонатора $G_\delta = G_{\text{н}} + G_{\text{п}}$,где $G_{\text{н}}$- активная проводимость самой нагрузки. Для связи резонатора с нагрузкой используются различные виды элементов связи (петля, штырь, щель). При анализе СВЧ цепей, рассмотрении принципов работы СВЧ приборов объемный резонатор можно заменить эквивалентным колебательным контуром, параметры которого выражаются через основные параметры объемного резонатора, обычно определяемые экспериментально.

7. Замедляющие системы электровакуумных приборов СВЧ. Понятие о пространственных гармониках. Дисперсия ЗС, виды дисперсии

В приборах СВЧ, использующих нерезонансные колебательные системы, эффективность взаимодействия электронов с полем обеспечивается не большой амплитудой поля, а многократностью взаимодействия или длительным непрерывным взаимодействием, что может быть достигнуто при условии приблизительного равенства фазовой скорости волны Vф и скорости электронов Vo . Равенство скоростей волны и электронов может быть достигнуто замедлением волны при помощи замедляющих систем, которые представляют собой линии передачи с периодически изменяющимся сечением или с периодически повторяющимися неоднородностями. Основными требованиями, предъявляемыми к замедляющим системам, являются: уменьшение скорости распространения электромагнитной волны до скорости электронов и создание продольной составляющей электрического поля, способной взаимодействовать с электронным потоком. При реально используемых ускоряющих напряжениях U о порядка сотен или тысяч вольт, скорость электронов V о не превышает сотых или десятых долей скорости света. Поэтому коэффициент замедления системы $К_З = \frac{c}{V_ф}$ должен быть равен примерно 5..50. Принцип замедления волны можно показать на примере спиральной замедляющей системы, представляющей собой коаксиальную линию, внутренний проводник которой выполнен в виде спирали с шагом (периодом) равным τ и диаметром D. В такой структуре волна распространяется по внутреннему проводнику со скоростью V, близкой к скорости света. За время движения вдоль одного витка спирали длиной 2πD волна переместится на расстояние τ, т.е. коэффициент замедления в такой системе будет равен $К_З = 2\pi D/\tau$. Спиральные замедляющие системы получили широкое распространение из-за слабой зависимости замедления от частоты. Эффективность взаимодействия потока электронов с волной в замедляющей системе характеризуется сопротивлением связи: $R_c = \frac{{E_z}^2 {V_ф}^2}{2\omega^2 P}$, где E_z- амплитуда продольной составляющей напряженности электрического поля на оси спирали, P – поток мощности замедленной волны через поперечное сечение спирали, ω – угловая частота. Величина R с лежит в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен Ом. При поступлении в неоднородную замедляющую систему гармонического колебания СВЧ с частотой ω поле последнего наводит в ней несинусоидальную бегущую волну. Поле такой волны можно представить как результат наложения бесконечного числа бегущих волн (пространственных гармоник), отличающихся значением и направлением фазовой скорости, амплитудой, но имеющих одинаковую частоту колебаний ω. Пространственные гармоники не следует путать с временными, которые получаются при разложении в ряд несинусоидальных периодических функций времени и имеют кратные частоты. Фазовая скорость пространственных гармоник определяется выражением $V_{фn} = \frac{\omega}{\beta_n} = \frac{\omega}{\beta_0 + 2\pi n/\tau}$, где n=0, $\mp 1, \mp 2$ ...- номер пространственной гармоники. Групповая скорость всех пространственных гармоник одинакова по величине и направлению. Это отражает то обстоятельство, что энергия переносится всей волной в целом, т.е. пространственные гармоники могут существовать только совместно. Пространственные гармоники принято называть положительными (прямыми), если направления групповой и фазовой скорости совпадают n > 0. При противоположном направлении скоростей пространственные гармоники называются обратными или отрицательными n <0. Нулевая гармоника (n = 0) может быть прямой и обратной. В замедляющей системе фазовая и групповая скорости зависят от частоты. Эти зависимости называют дисперсией. Дисперсию называют нормальной, если абсолютное значение фазовой скорости уменьшается с ростом частоты.

8. Полный ток в промежутке между электродами и во внешней цепи электровакуумных приборов. Понятие о наведенном и конвекционным токе

Как известно, в электронных лампах используется электростатическое управление электронным потоком, заключающееся в том, что изменение напряженности электрического поля в рабочем объеме лампы вызывает изменение высоты потенциального барьера для электронов в области объемного заряда около катода, а следовательно, изменение числа электронов, участвующих в создании тока. За время пролета электрона сильно изменяются напряжение на электродах и электрическое поле в пространстве между ними. Если амплитуда переменного напряжения велика, возможно, даже возвращение электронов к катоду. Для учета влияния времени пролета электронов на токи электродов применяется понятие наведенного тока, которое будет использовано и при рассмотрении специальных приборов СВЧ. Наведенный ток возникает, как только электронный слои появляется в промежутке между электродами, и исчезает, когда электронный слой достигает второго электрода. Длительность импульса наведенного тока равна времени пролета электронов. Возникновение сгустков электронов в пространстве группирования является причиной появления здесь конвекционного тока, величина которого зависит от времени и расстояния.

9. Конструкция и принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона, пространственно-временная диаграмма работы

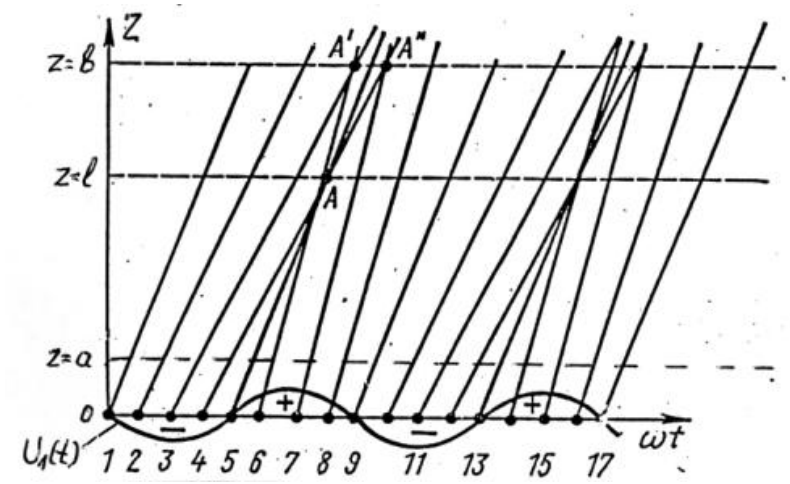
Электроны, эмиттируемые подогревным катодом, ускоряются полем ускоряющего электрода, на который подается положительное ускоряющее напряжение Uo . Этот электрод также несколько фокусирует электронный поток, движущийся далее к входному резонатору. Это же напряжение прикладывается к резонаторам, трубе дрейфа и коллектору клистрона, которые обычно заземляются для удобства охлаждения, поскольку резонаторы связаны с линиями передачи, а коллекторы в мощных клистронах охлаждаются жидкостью. К входному резонатору, называемому обычно модулятором, через коаксиальную линию или волновод и петлю связи подводятся СВЧ колебания, подлежащие усилению. Наводимое входным сигналом между сетками входного резонатора переменное напряжение $U_1 = U_{m1} \sin\omega t$ имеет амплитуду, значительно меньшую ускоряющего напряжения $U_{m1} < U_o$. Поэтому электронный поток, проходя промежуток между сетками резонатора, под воздействием переменного напряжения почти не изменяет своей плотности, но после прохождения резонатора электроны будут иметь различные скорости. Время прохождения электронами через зазор резонатора много меньше периода колебания, т.е. $\tau_1 < T$, из-за достаточно большой скорости электронов V_o. Поскольку переменное напряжение между сетками резонатора мало, то и различие в скоростях электронов, прошедших входной резонатор, будет небольшим. Дальнейшее движение электронов в трубе дрейфа будет проходить в отсутствие электрического поля под действием сил инерции. Эту область, где электроны движутся по инерции, но с различными начальными скоростями, называют пространством дрейфа. Время движения электронов в пространстве дрейфа велико по сравнению с периодом колебаний, поэтому быстрые электроны успевают догнать медленные, образуя сгустки и разрежения электронов. Таким образом, небольшие изменения по скорости электронов, происходящие в результате воздействия переменного напряжения между сетками входного резонатора, приводят к существенным изменениям плотности электрического потока. Непрерывный электронный поток превращается в прерывистый, состоящий из сгустков и разряжений электронов. Сгустки электронов поступают в выходной резонатор с частотой, равной частоте входного сигнала, и наводят в нем импульсы тока. В резонаторе возникают СВЧ колебания с частотой, равной частоте колебаний, подводимых к входному резонатору. Появляющееся между сетками резонатора электрическое поле тормозит сгруппированные электроны, кинетическая энергия, полученная ими от источника ускоряющего напряжения U_o, передается переменному электрическому полю резонатора, поддерживая таким образом возникшие в резонаторе колебания, отводимые в нагрузку через вывод энергии резонатора. Электроны, прошедшие выходной резонатор и отдавшие часть своей энергии СВЧ полю резонатора, попадают на коллектор, где рассеивают оставшуюся часть кинетической энергии в виде тепла. Мощность колебаний, установившихся в выходном резонаторе, превышает мощность колебаний подводимых к входному резонатору, так как расход энергии источника усиливаемых колебаний на группирование электронов близок к нулю, поскольку в течение одной половины периода при ускорении электроны отбирают энергию от переменного электрического поля, в течение другой - тормозятся и отдают свою энергию, а обмен энергией в выходном резонаторе происходит в одном направлении (от электронов к полю) из-за того, что сгустки электронов попадают в выходной резонатор в моменты времени, когда поле в зазоре резонатора тормозящее. Таким образом, мощность колебаний увеличивается за счет отбора энергии от источника постоянного напряжения. Электронный поток служит лишь для передачи этой энергии переменному полю выходного резонатора, а процесс модуляции электронов по скорости и группирование их в сгустки необходим для рациональной передачи этой энергии.

10. Ускорение и модуляция электронов по скорости в двухрезонаторном пролетном клистроне

Ускорение электронов происходит под действием статического электрического поля, возникающего при приложении между катодом и ускоряющим электродом напряжения U о источника постоянного тока. Это напряжение создает в промежутке между катодом и ускоряющим электродом электрическое поле с напряженностью $E_0 = \frac{U_0}{d}$, где d – расстояние между катодом и ускоряющим электродом. Если принять заряд электрона е, то поле будет действовать на электрон с силой $F_0 =$ eE_0 . Под действием этой силы электроны увеличивают свою скорость, приобретая дополнительную кинетическую энергию:$\frac{mV_0}{2} = eU_0$, где m- масса электрона. Можно найти скорость электронов $V_0 = 5.95 * 10^5\sqrt{U_0}$м/с. В процессе ускорения электроны приобретают от источника питания кинетическую энергию, преобразуемую в дальнейшем в энергию СВЧ колебаний. Ускорение электронов способствует уменьшению угла пролета электрона через зазор резонатора. Под действием входной СВЧ мощности между сетками входного резонатора появляется СВЧ напряжение u(t) = U_1sin(ωt_1), которое создает в зазоре резонатора напряженность поля:$E(t) = -\frac{U_1}{d_1} sin\omega t_1$, где d_1- расстоянии между сетками входного резонатора, U_1- амплитуда СВЧ напряжения, прикладываемого к зазору входного резонатора. В результате взаимодействия электронов, проходящих через зазор входного резонатора с переменным полем резонатора, их скорость на выходе резонатора становится периодической функцией времени. Скорость электронов после пролета зазора резонатора состоит из постоянной величины Vo и переменной составляющей, меняющейся во времени по закону синуса в зависимости от момента времени t_1 пролета электроном середины зазора резонатора. Коэффициент взаимодействия M_1 сложным образом зависит от угла пролета θ_1. Коэффициент взаимодействия M_1 увеличивается при уменьшении угла пролета. При угле пролета θ_1 = 2π, значение M_1 = 0, в этом случае время пролета электронов τ_1 равно периоду СВЧ напряжения на зазоре, поэтому действие ускоряющего полупериода на электроны компенсируется действием тормозящего полупериода, т.е. для электронов СВЧ напряжение как бы отсутствует. Коэффициент взаимодействия увеличивается при уменьшении угла пролета θ_1 . Получить небольшой угол пролета трудно, так как для этого необходимо увеличивать скорость электронов V0(увеличивать напряжение U0) или уменьшать величину зазора d_1, что приводит к снижению добротности резонатора. В реальных резонаторах клистронов угол пролета θ_1 равен 90..180градусов. Для таких углов пролета коэффициент взаимодействия M_1 = 0,6..0,9.

11. Группирование электронов в сгустки по скорости в двухрезонаторном пролетном клистроне

Процесс группирования электронного потока в пролетном клистроне можно наглядно иллюстрировать пространственно-временной диаграммой (ПВД) - семейством кривых, изображающих изменение координат электронов во времени.



Координата Z=0 соответствует середине зазора входного резонатора. Синусоида изображает переменное напряжение U1, между сетками этого резонатора. Электроны 1, 5, 9, 13, 17 не изменяют своих скоростей и двигаются в пространстве дрейфа со скоростью Vo. Эти электроны называются невозмущенными электронами. Угол наклона прямой к оси времени всегда меньше 90, т.к. скорость электронов не может достигать бесконечно большой величины.Скорость электронов 2, 3, 4 после прохождения тормозящего высокочастотного поля зазора станет меньше, чем невозмущенных. Поэтому равномерное движение этих электронов после прохождения резонатора изображается прямыми линиями с меньшим углом наклона. Электроны 6, 7, 8, пролетевшие резонатор в ускоряющем полупериоде, свою начальную скорость увеличат, что приведет к увеличению наклона прямых на ПВД. Таким образом, через плоскость пространства дрейфа, лежащей на расстоянии $Z = l$ от середины зазора входного резонатора, будет проходить периодическая (с частотой входного сигнала ω0) последовательность сгустков со средней скоростью электронов V 0 . При дальнейшем движении происходит перегруппировка сгустка, ускоренные, позднее вылетевшие электроны (например электрон 6) проходят вперед, обгоняя невозмущенный электрон (электрон 5), образуя передний фронт сгустка (точка A'), а замедленные, ранее вылетевшие, - задний фронт (точка A"), сгусток начинает раздваиваться. Как видно из ПВД, через плоскость Z = a, находящуюся вблизи к плоскости, проходящей через середину зазора резонатора, электроны проходят почти равномерно, т.е. слабосгруппированными. Это означает, что для образования сгустков принципиально необходима конечная протяженность пространства группировки.

12. Параметры и характеристики двухрезонаторного пролетного клистрона

Электронный КПД. Электронным КПД называют отношение выходной мощности к затраченной .
Коэффициенты усиления по мощности и напряжению. Коэффициенты усиления пролетного двухрезонаторного клистрона по мощности и напряжению равны $K_P = \frac{P_1}{P_2}$; $K_U = U_2/U_1$, где P_1 - высокочастотная мощность сигнала, подводимая к первому резонатору, P_2- выделяемая во втором резонаторе; U_1 и U_2- напряжение в резонаторах. Коэффициент усиления клистрона при малом сигнале не зависит от амплитуды сигнала, так как выходная P_2 и входная U_1 мощности одинаково зависят от параметра группирования X. Остановимся более подробно на влиянии угла пролета. С ростом угла пролета увеличивается параметр группирования и выходная мощность. В сгустке действуют силы расталкивания электронов. Сила расталкивания, совпадающая с направлением движения электронов, будет увеличивать скорость электронов в передней области сгустка и уменьшать скорость электронов, летящих сзади. В клистроне впереди летят более медленные электроны, а сзади—более быстрые, чем невозмущенный электрон, находящийся в центре сгустка. Поэтому продольная сила стремится выравнить скорости электронов в сгустке. На некотором расстоянии от резонатора скорости всех электронов станут одинаковыми и равными скорости V_0 невозмущенного электрона.

13. Двухрезонаторные клистронные генераторы и умножители частоты. Области применения пролетных клистронов.

Для создания клистронного генератора на основе двухрезонаторного клистрона достаточно обеспечить положительную обратную связь между выходным и входным резонаторами. На рис.2.12 показаны два варианта обратной связи с помощью коаксиальной линии 1 и отверстия связи 2 в общей стенке обоих резонаторов.

Для самовозбуждения клистрона и поддержания стационарных колебаний необходимо выполнение условий баланса фаз и баланса амплитуд. В клистронном генераторе сдвиг фазы между переменными СВЧ напряжениями в резонаторах определяется углом пролета электронов в пространстве группировки Q и сдвигом фазы, создаваемым устройством обратной связи $f_{ос}$. Условие баланса фаз определяется выражением

$$\varphi_{ос} + \theta = 2\pi(n + 3/4), \qquad (2.45)$$

где n = 1, 2, 3,.. - номер зоны, определяющий количество периодов СВЧ колебаний которые пропускает невозмущенный электрон за время движения в трубе дрейфа. Баланс фаз достигается выбором ускоряющего напряжения U_0.

При изменении ускоряющего напряжения в пределах зоны вследствие изменения фазовых условий самовозбуждения меняется частота колебаний, т.е. происходит электронная перестройка частоты. Ширина диапазона электронной перестройки составляет доли процента.

Вторым необходимым условием самовозбуждения клистрона является баланс амплитуд, при котором электронный поток вносит в выходной резонатор энергию, достаточную для покрытия потерь в резонаторах и цепях связи с нагрузкой. Это происходит в случае, если величина тока луча превосходит некоторое значение, называемое пусковым.

Основными достоинствами клистронных генераторов являются сравнительно высокая стабильность частоты, небольшие размеры и масса. Они используются в системах связи, доплеровской радиолокации, радиомаяках, а также для накачки параметрических усилителей.

Двухрезонаторный клистрон может использоваться в качестве умножителя частоты. Возможность эффективного умножения частоты обусловлена богатым содержанием высших гармоник в волне конвекционного и наведенного токов в выходном резонаторе, причем амплитуда гармоник довольно медленно уменьшается с ростом номера гармоники (табл.2.1).

В клистронных умножителях частоты умножение частоты может сопровождаться усилением входного сигнала, при котором коэффициент преобразования больше единицы:

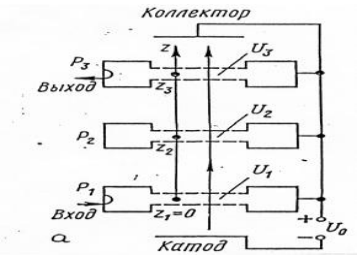
$$K_{пр} = P_{вых}\, m/P_{вх}. \qquad (2.46)$$

Недостатком клистронных умножителей является низкий КПД, который составляет единицы процентов выходная мощность не превышает при этом 1 Вт. Основной областью применения клистронных умножителей частоты являются системы СВЧ, в которых необходима высокая стабильность частоты. Пользуясь клистронными умножителями, можно получать колебания СВЧ от источника колебаний, стабилизированных кварцем.

14. Особенности работы многорезонаторных пролетных клистронов на примере трехрезонаторного клистрона.

Значительное увеличение коэффициента усиления, КПД, расширение полосы пропускания достигается в клистронах, содержащих несколько объемных резонаторов, связанных одним электронным потоком. Рассмотрим особенности работы многорезонаторных клистронов на примере трехрезонаторного клистрона, показанного на рис.2.13,а. Между входным 1 и выходным 3 резонаторами располагается еще один промежуточный ненагруженный резонатор 2.

Будем считать, что входная мощность мала, а все резонаторы настроены на частоту усиливаемого сигнала (синхронная настройка). Как и в двухрезонаторном клистроне, во входном резонаторе многорезонаторного клистрона электроны модулируются по скорости. В пространстве дрейфа между входным и промежуточным резонаторами происходит группирование электронного потока, однако при слабом входном сигнале оно незначительно: электроны 1 и 2 (рис.2.13, б) лишь незначительно смещаются по направлению к невозмущенному электрону 0. Конвекционный ток в плоскости промежуточного резонатора будет иметь синусоидальную форму и незначительную амплитуду из-за малого малого параметра группирования. Так как промежуточный резонатор не нагружен и поэтому имеет высокую добротность ($Q_н = Q_0$), но даже при малой амплитуде конвекционного тока напряжение U_2, создаваемое наведенным током, будет большим и вызовет сильную модуляцию скорости электронов, пролетающих через промежуточный резонатор. Основное группирование электронов будет происходить во втором пространстве дрейфа (между промежуточным и выходным резонаторами). При синхронной настройке напряжение во втором резонаторе $U_2(t)$ противоположно по фазе первой гармонике конвекционного тока i_1. Для второго резонатора невозмущенным электроном будет электрон O', проходящий зазор в момент времени, когда $U_2(t) = 0$, около него должно происходить основное группирование. Поэтому распределение электронов в сгустке при слабом сигнале практически будет определяться вторым резонатором, и конвекционный ток в выходном резонаторе будет примерно такой же, как в двухрезонаторном клистроне, образованным вторым и третьим резонаторами при модуляции скорости напряжением U_2.



Значительное увеличение коэффициента усиления в трехрезонаторном клистроне объясняется тем, что группирование электронов происходит при существенно меньшей мощности, подводимой к входному резонатору. Максимальное значение амплитуды первой гармоники конвекционного тока, а значит, максимальная выходная мощность и электронный КПД, достигаемые в оптимальном режиме при синхронной настройке в трехрезонаторном клистроне, остаются практически такими же, как в двухрезонаторном клистроне.

Оптимальная расстройка промежуточного резонатора при усилении большого сигнала улучшает группирование электронов; в образовании сгустка участвует большее количество электронов, улучшается форма сгустка; в

15. Конструкция, принцип действия, пространнственно-временная диаграмма и параметры отражательного клистрона.

Области применения отражательных клистронов.

Отражательный клистрон представляет собой резонансный генератор колебаний СВЧ, в котором одна и та же колебательная система (резонатор) используется как для модуляции электронного потока по скорости, так и для отбора энергии от него. На рис.2.15 показано устройство и схема питания отражательного клистрона. Электроны, эмитируемые катодом, ускоряются в пространстве между катодом и резонатором, к которому приложено ускоряющее напряжение U_o. В установившемся режиме между сетками резонатора существует переменное СВЧ напряжение $u(t) = U_1\sin(\omega t)$, которое производит модуляцию скорости электронов. После пролета резонатора электроны двигаются равнозамедленно в тормозящем электрическом поле, создаваемом отражателем, к которому прикладывается отрицательное напряжение $U_{отр}$ по отношению к катоду.

Под действием тормозящего поля отражателя электроны уменьшают свою скорость до нулевого значения, затем начинают обратное движение и возвращаются в резонатор. В процессе этого движения (к отражателю и обратно) происходит группирование электронов (рис.2.15). Группирование электронов происходит вокруг электрона 2, который не изменил свою скорость при пролете резонатора (невозмущенный электрон), в результате того, что медленные электроны 2 догоняют ускоренные электроны 1, проходя меньший путь в пространстве между резонатором и отражателем.

Чтобы образовавшиеся сгустки электронов отдавали энергию СВЧ полю и поддерживали колебания в резонаторе, они должны возвращаться в резонатор в тормозящий полупериод.

Очевидно, что сгусток отдаст наибольшую энергию СВЧ полю, если центральный его электрон (невозмущенный) приходит в момент максимума поля. Как видно из рис.2.16, для этого необходимо выполнение условия

$$\theta_{0\,опт} = 2\pi(n + 3/4), \qquad (2.48)$$

где $\theta_{0\,опт}$ - оптимальный угол пролета невозмущенного электрона в пространстве группирования, n = 1, 2, 3,.. - целое число, называемое номером зоны генерации. Угол пролета меняется регулированием напряжения $U_{отр}$ на отражателе клистрона.

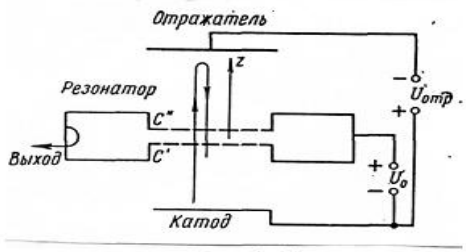


Рис.2.15

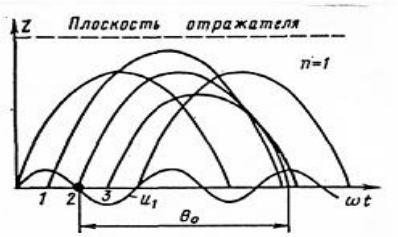


Рис.2.16

На рис.2.17 а,б представлены зависимости мощности и частоты колебаний клистрона от напряжения на отражателе. Эти зависимости имеют зонный характер. С увеличением $|U_{отр}|$ уменьшается угол пролета, а следовательно, и номер зоны. Максимальное значение мощности в каждой зоне наблюдается при напряжении отражателя, которому соответствует оптимальный угол пролета электронов. Это напряжение называют напряжением в центре зоны $U_{отр\ цз}$, оно может быть определено из выражения

$$n + 3/4 = \frac{\sqrt{f\ell\, 8mU_0/e}}{U_0 - U_{отр\,цз}}, \qquad (2.49)$$

где f - частота генерируемых колебаний, ℓ - расстояние между отражателями и резонатором, U_0 – напряжение на резонаторе.

Частота генерации отражательного клистрона зависит от напряжений резонатора U_0 и отражателя $U_{отр}$. Обычно электронная перестройка производится изменением напряжения отражателя. Так как цепь отражателя не Диапазон электронной перестройки клистронов обычно составляет 0,5...0,8 % средней частоты.

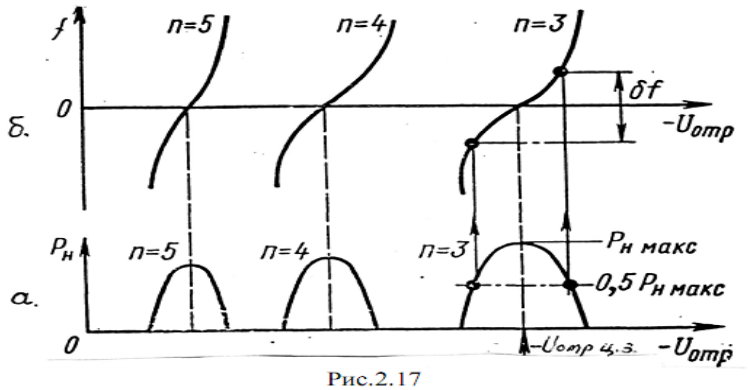


Рис.2.17

Отражательные клистроны способны работать в диапазоне частот от 0,8 до 220 ГГц. Из-за низкого КПД (единицы процентов) применение отражательных клистронов ограничивается областями малых мощностей (десятки и сотни милливатт), где малый КПД не является существенным недостатком. В основном отражательные клистроны нашли широкое применение в качестве гетеродинов приемных устройств СВЧ диапазона, задающих генераторов передающих устройств и т.п.

16.Устройство и принцип действия лампы бегущей волны О-типа.

Лампой бегущей волны О-типа называют ЭВП СВЧ, в котором используется длительное взаимодействие электронного потока, движущегося в продольном электрическом и магнитном полях с прямой гармоникой сигнала

(бегущей волной), распространяющейся вдоль замедляющей системы. ЛБВО представляет собой усилительный прибор СВЧ диапазона. Длительное взаимодействие (в течение десятков и сотен полупериодов) электронов с электрическим полем волны позволяет получить требуемое группирование электронного потока при относительно слабом входном сигнале. Очевидно, что обмен энергией между электронами и волной происходит в результате взаимодействия электронов с продольной составляющей электрического поля волны, совпадающей по направлению со скоростью электронов.

Эффективное взаимодействие электронов с бегущей волной возможно, когда скорость электронов V_0 приближенно равна фазовой скорости электромагнитной волны $V_ф$ в направлении движения электронов.
Это называется условием фазового синхронизма и выражается следующим образом:

$$V_0 - V_ф \approx 0. \qquad (2.50)$$

На рис.2.18 схематично представлено устройство ЛБВО. ЛБВО состоит из трех основных элементов: электронного прожектора (пушки), замедляющей системы, фокусирующей системы. Электронный прожектор служит для создания ускоренного электронного потока с определенным сечением и интенсивностью. Он состоит из подогревного катода К, управляющего электрода УЭ, одного или двух анодов А1, А2. Управляющий электрод находится под небольшим отрицательным напряжением $U_у$ относительно катода, регулируя величину которого можно изменять интенсивность электронного потока, т.е. величину тока луча.

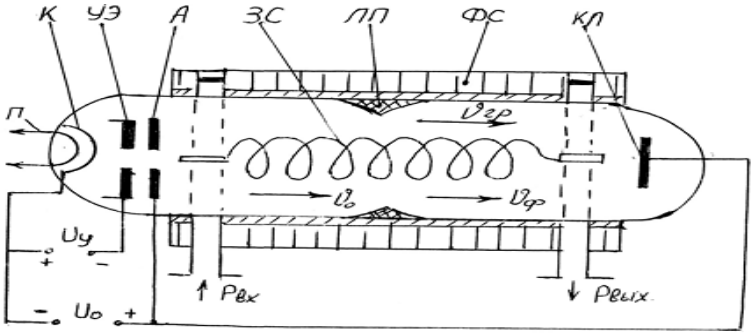


Рис.2.18

Электронный поток, прошедший через замедляющую систему, оседает на коллекторе КЛ, который для улучшения условий охлаждения обычно заземляется. Замедляющая система, связанная с внешними линиями передачи, заземляется так, что катод электронной пушки находится под высоким отрицательным напряжением U_0.

Для предотвращения самовозбуждения ЛБВ в замедляющей системе размещают локальный поглотитель ЛП, с помощью которого устраняется обратная связь, возникающая при отражении сигнала от выхода замедляющей системы. На

Принцип работы ЛБВО так же, как и пролетного клистрона основан на динамическом управлении электронным потоком, т.е. на модуляции электронного потока по скорости, которая по мере движения электронов к коллектору переходит в модуляцию по плотности и отборе части кинетической энергии сгруппированного потока электронов при торможении сгустков в электрическом поле бегущей волны. В отличие от клистронов в ЛБВ группирование и отбор энергии от электронов не разделены в пространстве и происходят непрерывно при совместном движении волны и потока электронов в замедляющей системе.

17.Энергетическое взаимодействие электронов с бегущей волной (пространнственно-временная диаграмма ЛБВО)

Коэффициент усиления по мощности K_p зависит от величины входной мощности $P_{вх}$, частоты усиливаемого сигнала f, ускоряющего напряжения U_o.

Амплитудная характеристика ЛБВО или зависимость выходной мощности и коэффициента усиления от входной мощности сигнала представлена на рис.2.20. При малых уровнях входного сигнала коэффициент усиления максимален и в диапазоне $P_{вх1}..P_{вх2}$, называемым динамическим, остается практически неизменным. В этой области работают обычно входные усилители на ЛБВ. Величина динамического диапазона ЛБВО ($10\lg(P_{вх2}/P_{вх1})$) достигает 80..90 дБ. Наличие максимума и последующего спада выходной мощности объясняется тем, что величина выходной мощности $P_{вых\ макс}$ ограничена мощностью постоянного тока ($P_0 = I_0U_0$), подводимой к электронному лучу, и перегруппировкой электронов из-за сильного торможения сгустков электронов при больших уровнях входного сигнала.

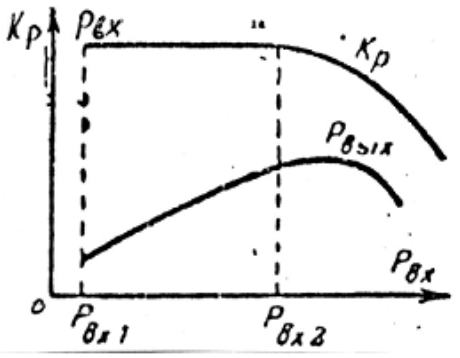


Рис. 2.20

По величине максимальной выходной мощности ЛБВО подразделяются на лампы малой мощности (до 1 Вт), средней мощности (более 100 Вт) и сверхмощные (более 1000 Вт). Различают ЛБВО непрерывного и импульсного действия. Мощные выходные ЛБВО способны обеспечить на выходе мощность порядка 10кВт в непрерывном и более 10 МВт в импульсном режиме.

Величина максимальной выходной мощности ЛБВО определяется простым выражением

$$P_{вых} \approx 2CU_0I_0, \qquad (2.55)$$

КПД является важным параметром в ЛБВО большой мощности. В процессе усиления из-за торможения сгустков электронов происходит нарушение условия синхронизма $V_o > V_ф$, электроны, отставая от волны, начинают переходить из тормозящего ее полупериода в ускоряющий и отбор энергии от потока прекращается. Качественная оценка величины КПД может

Соответственно для КПД справедлива следующая приближенная оценка

$$\eta \approx (V_0^2 - V_ф^2)/V_0^2 \approx 1-(V_ф/V_0)^2,$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ЛБВО показана на рис.2.21. Полоса рабочих частот $f_{макс}$ - $f_{мин}$ оценивается для ЛБВО по допустимому (обычно 3 дБ) спаду коэффициента усиления при изменении частоты сигнала относительно средней частоты f_o, на которой коэффициент усиления максимален.

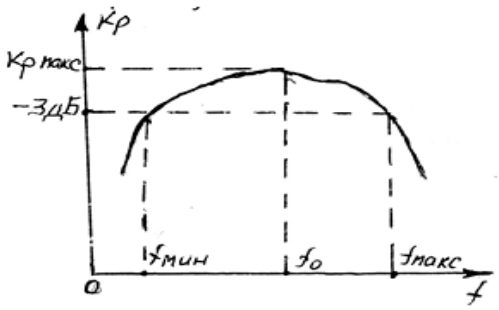


Рис. 2.21

Выходная мощность ЛБВО зависит от ускоряющего напряжения U_o. Эта зависимость называется характеристикой взаимодействия (рис.2.22). Выходная мощность достигает максимальной величины при некотором оптимальном значении ускоряющего напряжения U_o, при котором соотношение скорости электронов и фазовой скорости волны соответствует наилучшим условиям передачи энергии от электронов волне. ЛБВО перекрывают диапазон частот от 0,5 до 100 ГГц. ЛБВО непрерывного режима средней мощности широко используются в бортовой аппаратуре спутников связи, выходных каскадах передатчиков радиорелейных линий

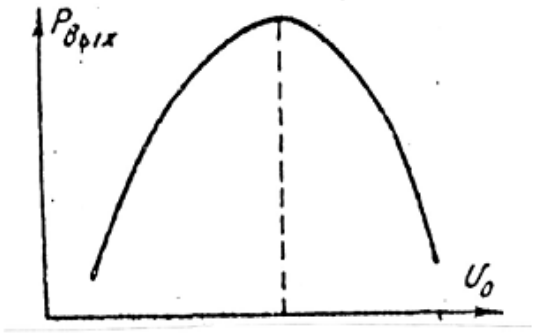


Рис. 2.22

18.Основные параметры и характеристики ЛБВО: коэффициент усиления, КПД, амплитудная, амплитудно-частотная и фазовая характеристики, шумовые параметры.

Одним из основных параметров ЛБВ является коэффициент усиления по мощности K_p, который обычно выражается в децибелах и в линейном режиме работы ЛБВ, определяется выражением

$$K_p = 47{,}3CN - 9{,}54 - L_п, \qquad (2.52)$$

где N - число длин волн, укладывающихся вдоль замедляющей системы длиной L:

$$N = L/\lambda_c, \qquad (2.53)$$

λ_c - длина волны усиливаемого сигнала в замедляющей системе, C - параметр усиления, равный

$$C = \sqrt[3]{\frac{R_c I_0}{4U_0}}, \qquad (2.54)$$

здесь I_0 - постоянный ток луча, U_0 - ускоряющее напряжение, R_c - сопротивление связи замедляющей системы, $L_п$ = 5..10 дБ - потери в локальном поглотителе.

Коэффициент усиления по мощности K_p зависит от величины входной мощности $P_{вх}$, частоты усиливаемого сигнала f, ускоряющего напряжения U_o.

Амплитудная характеристика ЛБВО или зависимость выходной мощности и коэффициента усиления от входной мощности сигнала представлена на рис.2.20. При малых уровнях входного сигнала коэффициент усиления максимален и в диапазоне $P_{вх1}..P_{вх2}$, называемым динамическим, остается практически неизменным. В этой области работают обычно входные усилители на ЛБВ. Величина динамического диапазона ЛБВО ($10\lg(P_{вх2}/P_{вх1})$) достигает 80..90 дБ. Наличие максимума и последующего спада выходной мощности объясняется тем, что величина выходной мощности $P_{вых\ макс}$ ограничена мощностью постоянного тока ($P_0 = I_0U_0$), подводимой к электронному лучу, и перегруппировкой электронов из-за сильного торможения сгустков электронов при больших уровнях входного сигнала.

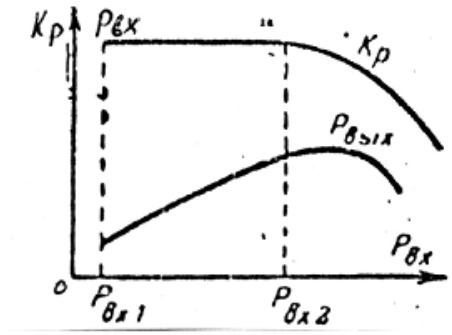


Рис. 2.20

По величине максимальной выходной мощности ЛБВО подразделяются на лампы малой мощности (до 1 Вт), средней мощности (более 100 Вт) и сверхмощные (более 1000 Вт). Различают ЛБВО непрерывного и импульсного действия. Мощные выходные ЛБВО способны обеспечить на выходе мощность порядка 10кВт в непрерывном и более 10 МВт в импульсном режиме.

Величина максимальной выходной мощности ЛБВО определяется простым выражением

$$P_{вых} \approx 2CU_0I_0, \qquad (2.55)$$

КПД является важным параметром в ЛБВО большой мощности. В процессе усиления из-за торможения сгустков электронов происходит нарушение условия синхронизма $V_o > V_ф$, электроны, отставая от волны, начинают переходить из тормозящего ее полупериода в ускоряющий и отбор энергии от потока прекращается. Качественная оценка величины КПД может

Соответственно для КПД справедлива следующая приближенная оценка

$$\eta \approx (V_0^2 - V_ф^2)/V_0^2 \approx 1-(V_ф/V_0)^2,$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ЛБВО показана на рис.2.21. Полоса рабочих частот $f_{макс}$ - $f_{мин}$ оценивается для ЛБВО по допустимому (обычно 3 дБ) спаду коэффициента усиления при изменении частоты сигнала относительно средней частоты f_o, на которой коэффициент усиления максимален.

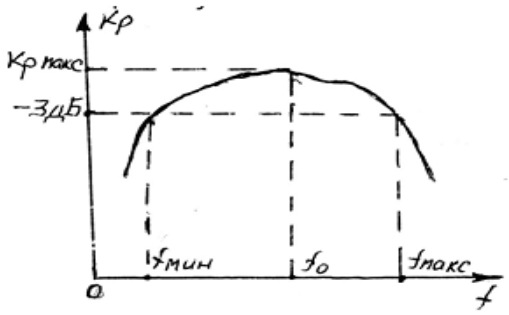


Рис. 2.21

Выходная мощность ЛБВО зависит от ускоряющего напряжения U_o. Эта зависимость называется характеристикой взаимодействия (рис.2.22). Выходная мощность достигает максимальной величины при некотором оптимальном значении ускоряющего напряжения U_o, при котором соотношение скорости электронов и фазовой скорости волны соответствует наилучшим условиям передачи энергии от электронов волне. ЛБВО перекрывают диапазон частот от 0,5 до 100 ГГц. ЛБВО непрерывного режима средней мощности широко используются в бортовой аппаратуре спутников связи, выходных каскадах передатчиков радиорелейных линий

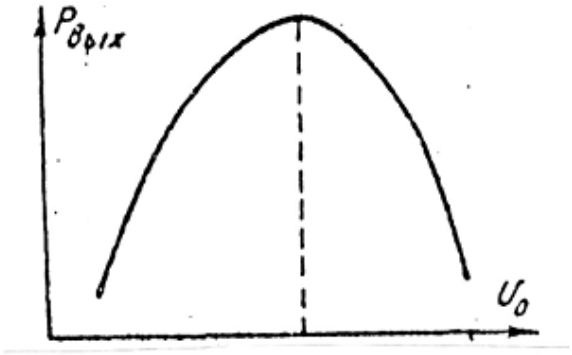


Рис. 2.22

19.Особенности конструкции и области применения ЛБВО.

Лампой бегущей волны О-типа называют ЭВП СВЧ, в котором используется длительное взаимодействие электронного потока, движущегося в продольном электрическом и магнитном полях с прямой гармоникой сигнала (бегущей волной), распространяющейся вдоль замедляющей системы. ЛБВО представляет собой усилительный прибор СВЧ диапазона. Длительное взаимодействие (в течение десятков и сотен полупериодов) электронов с электрическим полем волны позволяет получить требуемое группирование электронного потока при относительно слабом входном сигнале. Очевидно, что обмен энергией между электронами и волной происходит в результате взаимодействия электронов с продольной составляющей электрического поля волны, совпадающей по направлению со скоростью электронов.

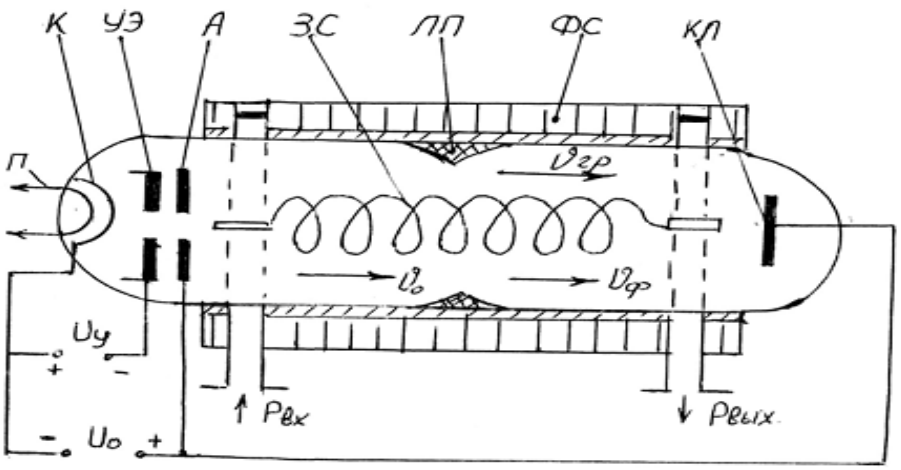


Рис.2.18

Рассмотрим особенности происходящих в ЛБВ процессов, приводящих к усилению СВЧ колебаний. Ускорение электронов в ЛБВО происходит под действием ускоряющего напряжения U_0, прикладываемого к аноду электронной пушки. Величина ускоряющего напряжения U_0 определяет не только кинетическую энергию электронов, но и условия передачи этой энергии электрическому полю бегущей волны в замедляющей системе. Скорость электронов U_0 при входе в заземляющую систему должна соответствовать условию фазового синхронизма (2.50).

Модуляция электронов по скорости происходит на начальном участке замедляющей системы под действием продольной составляющей электрического поля E_z бегущей волны, создаваемой входным сигналом (рис.2.19,а).

Для эффективной передачи энергии бегущей волне сгустки электронов должны слегка обгонять волну, чтобы находиться в тормозящих полупериодах (рис.2.19,а). Для этого ускоряющее напряжение U_o должно быть такой величины, чтобы скорость электронов несколько превышала фазовую скорость волны $V_0 > V_ф$. Так как скорость электронов в процессе взаимодействия с волной будет уменьшаться, то по мере движения вдоль замедляющей системы сгустки электронов будут смещаться относительно бегущей волны. Поэтому необходимо такое различие в скоростях электронов и волны, чтобы за время движения сгустка вдоль замедляющей системы он не вышел из области тормозящего поля. Обычно разница между V_0 и $V_ф$ не более 5..10 %.

Рис. 2.20

Мощные выходные ЛБВО способны обеспечить на выходе мощность порядка 10кВт в непрерывном и более 10 МВт в импульсном режиме.

Отличительной особенностью ЛБВО является то, что они используют нерезонансные колебательные системы и поэтому способны усиливать сигналы в широкой полосе частот.

В мощных лампах со средней мощностью 1 кВт и более применяются замедляющие системы в виде цепочки связанных резонаторов, обладающие высокой теплорассеивающей способностью (рис.2.4,б). Недостатки этих замедляющих систем - относительно узкая полоса пропускания и сильная дисперсия. Поэтому полоса усиления мощных ЛБВО редко превышает 10..20 %.

Маломощные ЛБВО в диапазоне частот до 18 ГГц практически вытеснены полупроводниковыми усилителями СВЧ. ЛБВО большой мощности находят применение в передатчиках радиолокационных станций и наземных станций космической связи.

20.Лампа обратной волны О-типа. Устройство и принцип действия.

Лампы обратной волны О-типа (ЛОВ) являются электронными приборами длительного взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной, распространяющейся по замедляющей системе, и представляют собой маломощные генераторы СВЧ с электронной перестройкой частоты в широких пределах.

Схематическое устройство ЛОВ показано на рис.2.23. Основными элементами ЛОВ являются: электронный прожектор, служащий источником электронов и формирующий электронный пучок; замедляющая система в виде двухзаходной спирали, уменьшающая фазовую скорость распространения электромагнитных волн; вывод высокочастотной энергии, расположенный в начале замедляющей системы со стороны, примыкающей к электронной пушке; коллектор, служащий для рассеивания энергии электронов и отвода тепла от лампы; фокусирующая система магнитного типа, создающая продольное магнитное поле.

Электронный прожектор состоит из подогревного катода 1, управляющего электрода 2, первого анода 3. Первый анод служит для уменьшения влияния напряжения на коллекторе, изменяющегося в больших пределах на величину тока коллектора. К первому аноду прикладывается положительное относительно катода напряжение U_a порядком нескольких десятков или сотен вольт, позволяющее регулировать величину тока коллектора. Управляющий электрод обычно соединяют с катодом. На замедляющую систему 4 и коллектор 5 подают положительное относительно катода ускоряющее напряжение U_o порядком нескольких сотен или тысяч вольт, измененяя которое осуществляют перестройку частоты генерации ЛОВ.

Вывод высокочастотной энергии 6 в зависимости от конструкции замедляющей системы может быть коаксиального и волноводного типа. Для упрощения конструкции вывода энергии коллектор и замедляющая система соединяются с корпусом лампы, а катод находится под напряжением по отношению к корпусу.

Для уменьшения вредного влияния отраженной от выхода замедляющей системы волны на процессы в лампе у коллектора размещают сосредоточенный поглотитель 7.

Магнитная фокусирующая система 8 выполняется в виде постоянного **магнита**

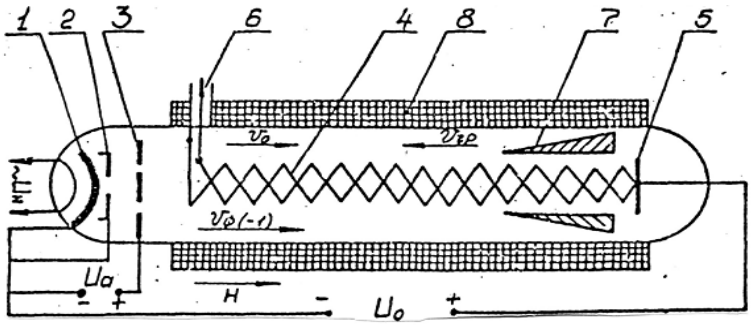


Рис.2.23

21.Баланс амплитуд и фаз ЛОВО. Области применения ЛОВО.

Чтобы в лампе обратной волны установились стационарные колебания, необходимо выполнение двух условий - баланса фаз и баланса амплитуд. Для лампы обратной волны баланс фаз можно записать в виде

$$\frac{\omega\ell}{V_{ф-1}} - \frac{\omega\ell}{V_0} = \pi(2n+1), \qquad (2.60)$$

где ℓ - длина замедляющей системы, n - 0,1,2,3,... - номер зоны (порядка) генерации, V_0 - скорость электронов, $V_{ф-1}$ – фазовая скорость первой обратной гармоники.

При n = 0 в лампе возникнут колебания основного вида. Для их возбуждения необходимо наименьшее значение скорости электронов V_0, а следовательно, наименьшая величина ускоряющего напряжения U_0. Генерация колебаний в ЛОВ начинается при определенном минимальном значении тока коллектора I_0, которое называется пусковым. При этом выполняется условие баланса амплитуд, которое для ЛОВ заключается в следующем: энергия, получаемая электромагнитной волной, в результате взаимодействия с электронным потоком должна быть достаточной для покрытия всех видов потерь и поддержания процессов модуляции электронного потока.

Для колебаний основного вида величина пускового тока

$$I_{n0} = \frac{0{,}124U_0}{R_c N^3}, \qquad (2.61)$$

где U_0 - ускоряющее напряжение, R_c - сопротивление связи замедляющей системы для первой обратной гармоники, $N = l/\lambda_c$ - отношение длины замедляющей системы l к длине волны в замедляющей системе λ_c.

Для самовозбуждения в ЛОВ колебаний первого порядка необходимо, чтобы выполнялось условие

$$I_{п1} > I_o > 2..5I_{по}, \qquad (2.62)$$

где $I_п$ - пусковой ток для колебаний первого порядка, I_0 – ток коллектора.

ЛОВ применяются в качестве гетеродинов радиолокационных и связных приемников, а также в измерительной аппаратуре в качестве свип-генераторов. В настоящее время ЛОВ выпускаются в основном для замены вышедших из строя в уже существующей аппаратуре. Новые типы ЛОВ разрабатываются только для субмиллиметрового диапазона. На более низких частотах ЛОВ заменяются полупроводниковыми приборами.

22.Параметры и характеристики ЛОВО: пусковой ток, электронная перестройка частоты и крутизна электронной
перестройки, выходная мощность, КПД.

Одним из наиболее ценных свойств ЛОВ является возможность перестройки частоты генерации за счет изменения электрического режима работы лампы. Длина волны генерируемых колебаний определяется выражением

$$\lambda = \frac{21}{2n+1}\left(\frac{c}{V_{ф-1}} - \frac{505}{U_0}\right), \qquad (2.63)$$

из которого следует, что с изменением ускоряющего напряжения U_0 и, следовательно, скорости электронов V_0 меняется длина волны генерируемых колебаний.

Ширину рабочего диапазона электронной
перестройки принято оценивать коэффициентом перекрытия диапазона:

$\delta_n = f_{макс}/f_{мин}$,

где $f_{макс}$, $f_{мин}$ - максимальная и минимальная граничные частоты диапазона, на которых выходная мощность ЛОВ уменьшается вдвое по сравнению с максимальным значением. При коаксиальном выводе энергии ЛОВ имеют

Для оценки зависимости частоты от напряжения U_0 используют понятие крутизны электронной перестройки частоты: $S_e = df/dU_0$. Крутизна электронной перестройки уменьшается с ростом U_0 (рис.2.24). Для ЛОВ сантиметрового диапазона крутизна - не больше нескольких мегагерц на вольт, а для миллиметрового - десятки мегагерц на вольт.

Выходная мощность ЛОВ зависит от ускоряющего напряжения (рис.2.24). Немонотонность зависимости связана с наличием отражений от поглотителя и недостаточностью согласования вывода энергии с замедляющей системой. Выходная мощность ЛОВ может быть оценена выражением

$$P_{вых} = \frac{2}{\pi N} U_0 (I_0 - I_{п0}). \qquad (2.64)$$

С ростом U_0 выходная мощность вначале растет, так как растет подводимая в ЛОВ мощность постоянного тока $P_0 = I_0U_0$, а затем в связи с увеличением $I_{п0}$ рост выходной мощности уменьшается, возможно наступление спада мощности.

Электронный коэффициент полезного действия ЛОВ не превышает нескольких процентов. Теоретическая величина электронного КПД определяется соотношением

$$\eta_э = 0{,}84C, \qquad (2.65)$$

где C - параметр усиления (2.54).

23.Движение электронов в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях.

В приборах магнетронного типа (типа М) происходит преобразование потенциальной энергии электронов, движущихся в скрещенных постоянном электрическом и магнитных полях в энергию СВЧ колебаний. В таких скрещенных полях электроны подвергаются воздействию сил электрического и магнитного полей и могут двигаться по различным траекториям.

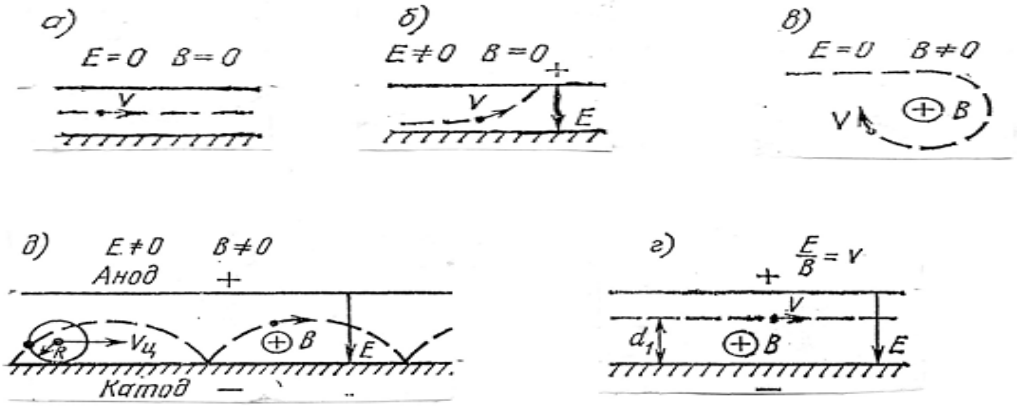
Сила, действующая на электрон в скрещенных полях, слагается в общем случае из силы действия электрического поля F_e и силы магнитного поля $F_м$.

$$F = F_e + F_м, \qquad (2.66)$$

где $F_e = -eE$, (2.67)

$$F_м = e[VB]. \qquad (2.68)$$

Характер движения электрона в междуэлектродном пространстве зависит от соотношения значений напряженности Е электрического поля и индукции В магнитного, а также от начальной скорости электронов (рис.2.25).



Если поля отсутствуют (Е = В = 0), то на электрон не действуют силы и он движется равномерно и прямолинейно (рис.2.25,а). При движении в одном лишь постоянном электрическом поле (В=0) электрон получает ускорение в направлении противоположном линиям Е, и его траектория соответственно искривляется (рис.2.25,б).

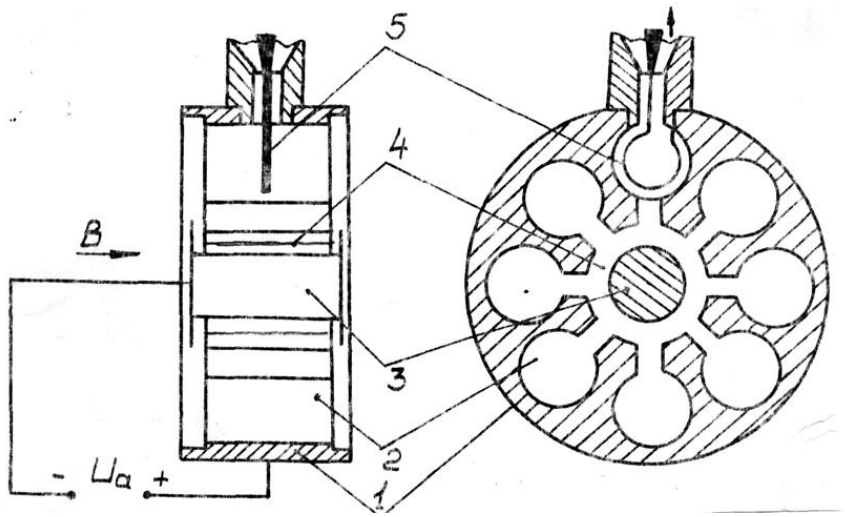
Под действием магнитного поля электрон, движущийся равномерно и прямолинейно, перейдет на круговую траекторию и будет вращаться вокруг магнитных силовых линий (рис.2.25,в), сохранив значение своей скорости V. В этом случае движение электрона в скрещенных полях будет прямолинейно и равномерно в сечении, находящимся от отрицательного электрода на расстоянии d_1 (рис.2.25,г), для которого выполняется условие $eEd_1 = mV^2/2$.

Если в скрещенных полях оказывается электрон с нулевой начальной скоростью, то его траектория оказывается циклоидой, т.е. кривой которую описывает точка, лежащая на окружности, катящейся без скольжения по плоскости (рис.2.25,д). При этом угловая скорость вращения окружности определяется выражением

$$\omega_ц = eB/m. \qquad (2.69)$$

24. Многорезонаторный магнетрон

Многорезонаторный магнетрон представляет собой генераторный прибор М-типа.



Анод магнетрона 1 представляет собой сплошной цилиндрический медный блок, разделенный на сегменты продольными щелями. Эти щели входят в состав полых резонаторов 2, расположенных на равных расстояниях по окружности анода. Катод магнетрона 3 имеет цилиндрическую форму и расположен внутри анода вдоль его оси. Пространство 4 между катодом и анодным блоком называется пространством взаимодействия.

Работа многорезонаторного магнетрона основана на длительном взаимодействии электронов с электрическим полем резонаторов. Электроны, эмиттируемые катодом магнетрона, подвергаются действию скрещенных постоянных электрического и магнитного полей и переменного СВЧ поля системы резонаторов.
В случае отсутствия СВЧ поля (статический режим) электроны, двигаясь ускоренно под действием анодного напряжения, пересекают силовые линии магнитного поля. При этом их траектории искривляются, и в зависимости от соотношения электрического и магнитного полей могут иметь различный вид.

При увеличении магнитного поля траектории электронов искривляются, и, начиная с некоторого значения индукции магнитного поля, называемого критическим $B_{кр}$, электроны не попадают на анод, а возвращаются к катоду. При этом анодный ток магнетрона резко падает. Такой режим работы магнетрона называется критическим.
Значение индукции $B_{кр}$, при которой достигается критический режим при заданном U_a, можно найти, в виде

$$B_{кр} = \sqrt{2m\,U_a\,/ed^2}$$

Очевидно, что критический режим магнетрона может быть достигнут при заданном значении индукции выбором анодного напряжения :

$$U_{акр} = \; ed^2\,B^2/2m$$

Кривую, построенную по данной формуле называют параболой критического режима.

25.Параметры магнетронов:выходная мощность,рабочая частота,электронный КПД.Области применения многорезонаторных магнетронов.

Многорезонаторные магнетроны используются в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц. Выходная мощность магнетронов непрерывного действия составляет от долей ватта до нескольких десятков киловатт, а импульсного действия - от 10 Вт до 10 МВт. Электронный КПД магнетронов может превышать 70%. Различают магнетроны, работающие на фиксированной частоте, и магнетроны, перестраиваемые по частоте в небольшом диапазоне (5…10 %) механическим изменением параметров колебательной системы.

Магнетроны импульсного режима работы используются в передатчиках радиолокационных станций, а магнетроны непрерывного режима в установках СВЧ-нагрева промышленного и бытового назначения.

Напряжение $U_{a\,пор}$, при котором начинается генерация колебаний, называется пороговым, при этом появляется анодный ток магнетрона. Величина порогового напряжения определяется приближенным выражением

$U_{a\,пор} = [f_{on}\pi(r_a^2 - r_k^2)/n]B$

где f_{on} - резонансная частота n-вида колебаний, r_a, $r_к$ – радиус анода и катода соответственно, n - номер вида колебаний.

Для возбуждения колебаний π-вида требуется наименьшее значение анодного напряжения, при этом достигается максимальное значение электронного КПД.

26.Модификация магнетронов.

Различные модификации магнетронов, принцип действия которых тождественен принципу работы многорезонаторного магнетрона, позволяют устранить недостатки и улучшить характеристики многорезонаторных магнетронов.

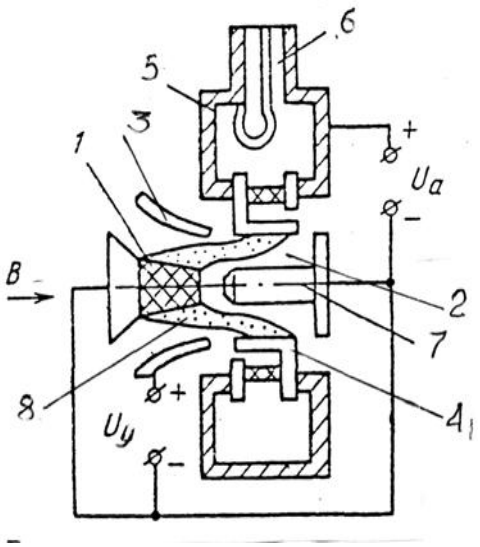
В коротковолновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах волн применяют обращенный коаксиальный магнетрон, в котором сплошной катод расположен снаружи колебательной системы, а стабилизирующий резонатор - внутри анодного блока и связан с резонаторами анодного блока щелями. Катод обращенного магнетрона имеет большую эмиттирующую поверхность, поэтому работает в облегченном режиме, что увеличивает срок службы обращенных магнетронов по сравнению с другими типами магнетронов.

ТаК же различают магнетроны настраиваемые напряжением (митроны), которые позволяют осуществлять электронную перестройку частоты в широких пределах изменением анодного напряжения.

И приборы магнетронного типа с разомкнутой резонансной системой, превращенной в замедляющую систему, и катодом, расположенным в пространстве взаимодействия- платинотроны.

27.Митроны.Устройство,принцип действия,характеристики и параметры.Области применения.

Магнетроны настраиваемые напряжением (митроны) позволяют осуществлять электронную перестройку частоты в широких пределах изменением анодного напряжения. Конструкция митрона значительно отличается от конструкции обычных магнетронов.



В митронах эмиттирующий катод 1, вынесен из пространства взаимодействия 2, управляющий электрод 3 уменьшает влияние анодного напряжения на величину анодного тока. К управляющему электроду прикладывается положительное относительно катода напряжения U_a порядка нескольких десятков или сотен вольт, позволяющее регулировать ток анода, а следовательно, выходную мощность митрона. Колебательная система митрона состоит из замкнутой встречно-штыревой замедляющей системы 4, соединенной с внешним низкодобротным резонатором 5 выводом энергии 6. Холодный катод 7 создает в пространстве электрическое поле. Постоянное магнитное поле создается системой постоянных магнитов и направлено по оси прибора. Трубчатый электронный поток 8 инжектируется в пространство взаимодействия, где происходит образование вращающихся электронных "спиц". При изменении анодного напряжения изменяется скорость вращения электронных спиц, а передача энергии от электронов высокочастотному полю бегущей волны в условиях фазового синхронизма происходит на той частоте, где фазовая скорость волны соответствует скорости электронных спиц. Поэтому изменение анодного напряжения приводит к перестройке частоты колебаний митрона. Связь между частотой генерации и напряжением анода в первом приближении определяется формулой

$$f = NU_a/[2\pi(r_a^2 - r_k^2)B].$$

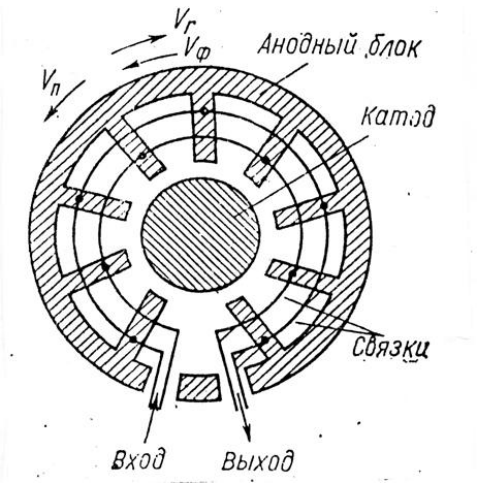
где N - число штырей в анодном блоке; r_a - радиус анода; $r_к$ - радиус катода; B - магнитная индукция.

Из-за низкой добротности внешней резонансной системы митроны обладают широким диапазоном электронной перестройки частоты, доходящим до одной октавы у маломощных митронов, их КПД составляет 10..20 %. Мощные митроны имеют высокий КПД, превышающий 70 %. Выходная мощность митронов составляет 10 мВт..500 Вт в диапазоне частот 0,2..11 ГГц. Крутизна электронной перестройки находится в пределах 0,2..10 МГц/В, что выше чем у ЛОВ типов О и М. Достоинствами митронов являются малые габариты и вес.
Митроны используют в быстроперестраиваемых передатчиках систем радиопротиводействия, в передающих устройствах радиовзрывателей, радиовысотомерах, а также в панорамных измерительных устройствах.

28.Платинотроны(амплитрон,стабилотрон).Устройство,принцип действия,параметры.Области применения.

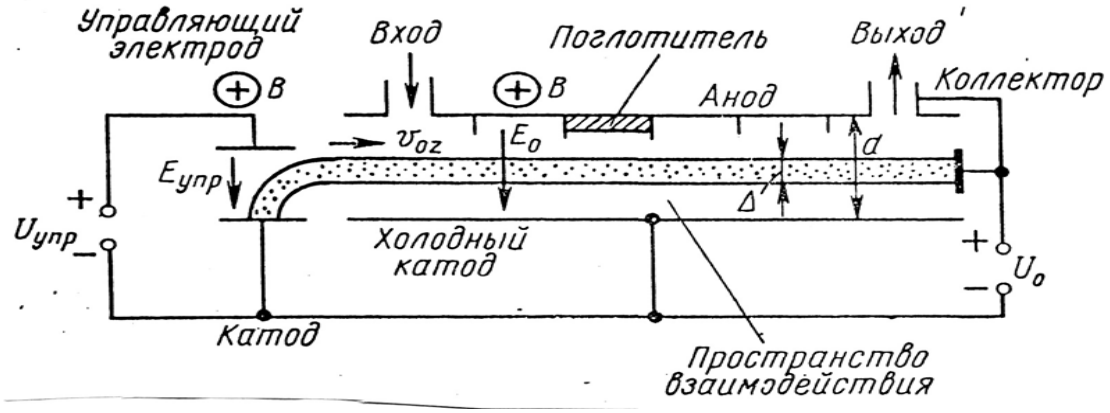
Приборы магнетронного типа с разомкнутой резонансной системой, превращенной в замедляющую систему, и катодом, расположенным в пространстве взаимодействия, получили название платинотронов. Платинотроны могут использоваться как усилители и генераторы СВЧ колебаний большой мощности. Усилительный платинотрон называется амплитроном, генераторный - карматроном. Широкое применение находят амплитроны.

Амплитрон подобно магнетрону имеет катод 1, параллельно оси которого направлено магнитное поле. Замедляющая система амплитрона 2 гребенчатого типа является разомкнутой, т.е. имеет два вывода 4 и 5, образованные разрывом связок 3. С целью предотвращения самовозбуждения колебаний р-вида замедляющая система амплитрона содержит нечетное число резонаторов. Незамкнутость анодного блока по высокой частоте резко снижает его добротность, что обуславливает сравнительно высокую широкополосность амплитрона (6..10 %).



Механизм взаимодействия электронного потока и электромагнитной волны в амплитроне, приводящий к усилению, аналогичен механизму работы многорезонаторного магнетрона. В амплитроне рабочей является обратная пространственная гармоника. Амплитроны применяются главным образом в качестве усилителей сравнительно мощных сигналов для получения больших выходных мощностей. В непрерывном режиме мощность достигает 500 кВт, а в импульсном - 10 МВт. КПД амплитронов достигает 60…80 %. Амплитрон имеет малый коэффициент усиления не превышающий 10…12 дБ. Из-за сильного насыщения на амплитудных характеристиках амплитрон не пригоден для усиления амплитудно-модулированных колебаний. Амплитроны отличаются высоким качеством фазовых характеристик. Амплитроны широко используются в мощных оконечных каскадах усилителей радиолокационных станций.

29.Конструкция ЛБВ типа М.Принцип действия.Основные характерискики ЛБВ типа М:коэфициент усиления, амплитудная характеристика, электронный КПД, полоса рабочих частот, коэфициент шума. Области применения.

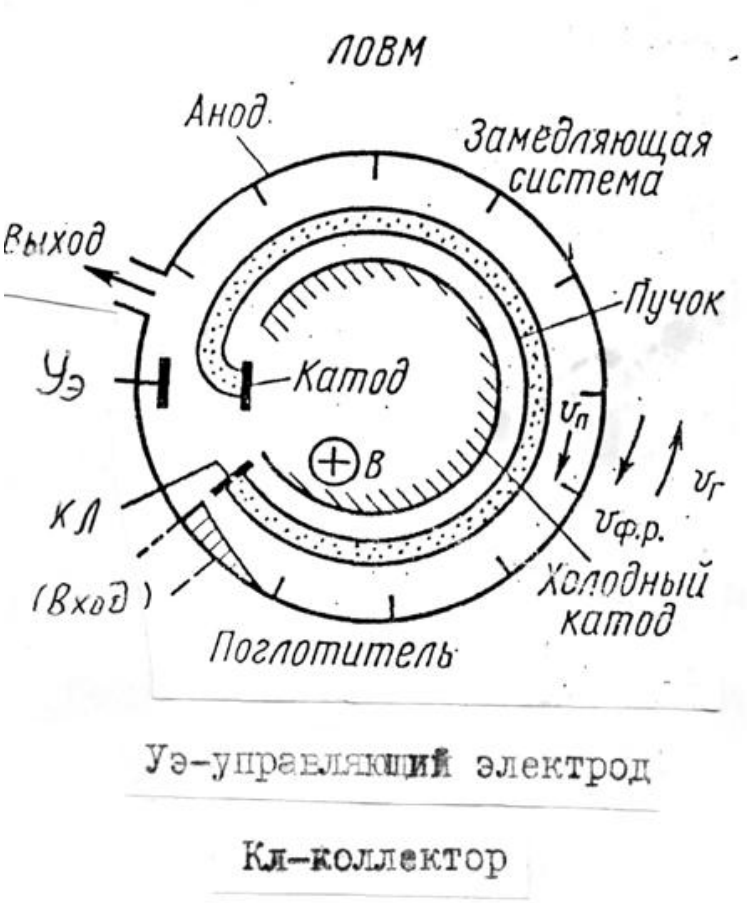


Электроны эмиттируемые катодом под действием положительного напряжения управляющего электрода поднимаются вверх. Постоянное магнитное поле В перпендикулярное плоскости рисунка направляет их в пространство взаимодействия между замедляющей системой (ЗС) и холодным катодом. При равенстве начальной скорости электронов в пространстве взаимодействия траектории электронов будут прямолинейны, и все электроны должны попадать в отсутствие СВЧ поля на коллектор. СВЧ мощность, поданная на вход замедляющей системы, возбуждает электромагнитную волну, движение которой вдоль замедляющей системы сопровождается образованием в пространстве взаимодействия неоднородного электрического поля. Если фазовая скорость волны $V_ф$ равна переносной скорости электронов V_n, то под действием поперечной составляющей этого поля электроны в потоке формируются в сгустки вокруг электрона, находящегося в максимуме тормозящего поля. Продольная составляющая тормозящего поля заставляет смещаться электроны вверх к замедляющей системе, в результате такого движения электроны теряют потенциальную энергию, отдавая ее полю волны, при этом продольная составляющая скорости электронов остается неизменной. В ускоряющих полупериодах электроны уходят к холодному катоду, не успевая отобрать значительной энергии у волны.

Для предотвращения самовозбуждения в ЛБВМ, также как и в ЛБВО, используется локальный поглотитель. ЛБВМ имеют более высокий КПД чем ЛБВО, достигающий 40..50 % без применения рекуперации. В непрерывном режиме ЛБВМ имеют выходную мощность до нескольких киловатт, а в импульсном режиме до нескольких мегаватт. Коэффициент усиления ЛБВМ составляет 20..25 дБ. ЛБВМ по сравнению с ЛБВО имеет более широкую полосу пропускания при одинаковых дисперсионных свойствах и сопротивлениях связи замедляющих систем. Это объясняется тем, что электронный поток в ЛБВМ состоит из электронов, имеющих различные скорости, и поэтому условие синхронизма выполняется в более широком интервале изменения фазовой скорости волны в замедляющей системе. Достоинством ЛБВМ является хорошая фазовая стабильность выходного сигнала. Широкое применение ЛБВМ находят в качестве мощных выходных усилителей дециметрового и сантиметрового диапазонов волн.

30.Особенности конструкции и принцип действия ЛОВ типа М. Характеристики и параметры.

В ЛОВМ происходит взаимодействие электронного потока с обратной пространственной гармоникой волны в замедляющей системе. Процесс взаимодействия электронов с СВЧ полем происходит в ЛОВМ так же, как в ЛБВМ. Поперечная составляющая электрического поля группирует электроны, продольная составляющая вызывает поперечное смещение сгруппированных электронов и преобразование их потенциальной энергии в энергию СВЧ поля. В процессе взаимодействия средняя скорость электронов остается постоянной и равной переносной скорости электронов. ЛОВМ являются самыми мощными генераторами с электронной перестройкой частоты. ЛОВМ перекрывают диапазон частот 0,15…18 ГГц с выходными мощностями от 5 кВт до единиц ватт. КПД достигает значений 35…40 %. Диапазон электронной перестройки составляет 30…40 %, при этом обеспечивается линейная зависимость частоты от ускоряющего напряжения.



Уэ–управляющий электрод

Кл–коллектор

Одинаковый диапазон изменения частоты в ЛОВМ можно получить для прочих равных условий при меньшем изменении напряжений чем в ЛОВО. ЛОВМ используются в системах радиопротиводействия, системах связи с частотной модуляцией.

31.Особенности смесительных и детекторных диодов СВЧ.ВАХ,эквивалентная схема,параметры смесительных и детекторных диодов.

Для детектирования и преобразования на более низкую частоту слабых СВЧ сигналов обычно используют детекторные и смесительные диоды, работающие как варисторы, поэтому в их конструкциях и характеристиках имеется много общего, а отличие в основном заключается в режиме работы. Современные детекторные и смесительные диоды используют структуры ДБШ, обладающие целым рядом достоинств, обусловленных тем, что ДБШ работают на основных носителях. Точечные прижимные диоды находят применение в основном в измерительной аппаратуре в качестве детекторных диодов. Иногда в детекторах и смесителях применяют обращенные диоды, у которых используется обратная ветвь ВАХ, обладающая высокой крутизной. Обращенные диоды имеют хорошие электрические характеристики, однако, из-за низкой электрической прочности, трудностей изготовления широкого применения не получили.Частотные свойства смесительных и детекторных диодов характеризует значение критической частоты диода:

$f_c = 1/(2\pi r_s C_б)^{-1}$ [ГГц].

Для эффективной работы диода необходимо, чтобы критическая частота диода была значительно выше рабочей частоты.

Электрическая прочность диодов в области обратных напряжений характеризуется нормируемым обратным напряжением $U_{норм.обр}$, при котором обратный ток достигает определенного значения, например для ДБШ Iобр = 10мкА. Для точечных диодов $U_{норм.обр}$ = 1…3 В, для ДБШ $U_{норм.обр}$ = 3…10 В, меньшие значения соответствуют более высокочастотным диодам. В области прямых токов электрическая прочность диодов характеризуется энергией "выгорания" - той минимальной энергией $W_{выг}$ импульса длительностью не более 10^{-8} с, после воздействи которого парамеры диода необратимо ухудшаются на заданное значение. Обычно $W_{выг} \approx 10^{-8}…10^{-7}$ Дж, поэтому диоды необходимо защищать от перегрузок и действия статического электричества.

При работе в непрерывном режиме допустимая рассеиваемая мощность $P_{рас}$ составляет 10…40 мВт для германиевых диодов и 10…100 мВт для кремниевых и ДБШ. Детекторные диоды находят основное применение для индикации и измерения параметров сигналов СВЧ и служат для преобразованиянепрерывны СВЧ сигналов в сигнал постянного тока или импульсного сигнала СВЧ в видеоимпульс

Смесительные диоды используют для преобразования частоты в радиоприемных устойствах СВЧ диапазона, причем очень часто смеситеь является входным каскадом приемного устройства. В таких случаях наиболее важными параметрами смесительных диодов, является коэффициент шума $К_ш$, потери преобразования L. У современных смесительных диодов $К_ш$ = 4…16 дБ. Меньшие значения $К_ш$ относятся к диодам более низких частот. Смесительные диоды являются пассивными элементами с внутренним активным сопротилением, поэтому при побразовании часоты происходят потери мощности полезного сигнала, обычно оцениваемые параметром L:

$L = 10 \lg(P_c/P_{пч})$ [дБ],

P_c - мощность сигнала, $P_{пч}$ - мощность сигнала на промежуточной частоте.

32.Особенности,хатактеристики и параметры параметрических диодов.

Работа параметрических диодов основана на использовании нелинейной зависимости барьерной емкости от напряжения, прикладываемого переходу, т.е. параметрические диоды относятся к варакторам. Эта зависимость определяется закКоном распределения примесей в переходе. В параметричеких диодах используют пееходы p-n тип или М-П (барьер Шотки). При обратном смещении величина $r \sim 1\ldots10$ МОм $>>$ $(\omega C_б)^{-1}$, поэтому можно считать, что переход имеет только нелинейную емКость $C_б$.

Основным параметром параметрических диодов считают постоянную времени $\tau = r_s C_б(U_o)$, определяющую инерционныесвойства диода и потери в нем, илипредельную частоту (частоту отсечки): $f_c = (2\pi\tau)^{-1} = [2\pi r_s C_б(U_o)]^{-1}$,измеряемые при заданном значении напряжения смещения U_o.

Типичное значение τ параметрических диодов 0,2…1 нс, что соответствует fc = 1000…150 ГГЦ.Потери в диоде характеризуют его добротностью, равной отношению реактивного сопротивления барьерной емкости диода к сопротивлению потерь r_s при заданных значениях U_o и f:

$$Q = [2\pi f C_б(U_o) r_s]^{-1}$$

Следует, что добротность параметрического диода на предельной частоте fc равна единице, а на рабочей частоте f определяеться КаК

$$Q = f_c/f.$$

Параметрические диоды используют в малошумящих параметрических усилителях в широком диапазоне частот (вплоть до 100 ГГц). Чрезвычайно низкий уровень собственных шумов параметрических усилителей позволяет создавать на их основе СВЧ приемные устройства с очень высокой чувствительностью - менее 10^{-12} Вт. Предельно низкие значения коэффициента шума $К_ш$ = 0,2…1,0 дБ имеют охлаждаемые параметрические усилители, работающие при емпературе 70…20 К. Применение таКих услителей ограничено сложностью их эксплуатации,и стоимостью. Гораздо более широкое применение получили неохлаждаемые параметрические усилители, которые на частотах выше 20 Гц являются основным типом малошумящих уилителей с $К_ш$ < 1 дБ.

Помимо усиления, параметрические диоды используются и для других целей, реализуемых с помощью электрически управляемой нелинейной емкости: преобразование частоты, модуляции сигналов электронной перестройки генераторов и т.п .

33.Особенности,хатактеристики и параметры умножительных диодов.

полупроводниковый диод, предназнач. для умножения частоты СВЧ колебаний. Действие осн. на использовании зависимости полного электрич. сопротивления диода от мощности внеш. сигнала и выделения (с помощью электрич. фильтра) из возникающего на выходе прибора спектра частот сигнала с частотой, кратной осн. частоте подводимых колебаний. Наибольшее распространение получили У. СВЧ д. типа варикапов: к ним относятся нек-рые плоскостные диоды (с определ. распределением легирующей примеси), Шотки диоды и диоды со структурой металл - оксид - полупроводник (т. н. МОП-структуры). Для преобразования частоты сигналов мощностью от единиц до сотен Вт в диапазоне частот 0,5 - 15 ГГц обычно используют кремниевые плоскостные У. СВЧ д., на более высоких частотах - арсенид-галлиевые: в случае сигналов малой мощности (до 100 мВт) чаще всего применяют диоды Шотки и У. СВЧ д. с МОП-структурой. У. СВЧ д. используются для повышения стабильности частоты и мощности генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн, а также для генерации СВЧ колебаний в диапазоне частот, где применение др. приборов (напр., транзисторов, лавинно-пролётных диодов) затруднено или невозможно.

34. Настроечные диоды

Барьерная емкость перехода полупроводникового диода, регулируемая изменением обратного напряжения, может быть использована для управления резонансной частотой колебательных систем генераторов и усилителей СВЧ, фильтров. Диоды, специально предназначенные для такого применения, получили название настроечных диодов (СВЧ варикапов).

Основные параметры настроечных диодов: коэффициент перекрытия по емкости Кс, добротность Q, емкость при заданном смещении $C_d(U_0)$, допустимое напряжение $U_{обр\ макс}$, допустимая мощность СВЧ $P_{свч\ макс}$. Коэффициент перекрытия по емкости равен отношению максимальной емкости диода к минимальной:

$$K_c = \frac{C_{d\ макс}}{C_{d\ мин}},$$

Где $C_{d\ макс} = C_c + C_{б(0)}$; $C_{d\ мин} = C_c + C_б(U_{обр\ макс})$.

Из зависимости $C_б\,(U) = C_б\,(U_0\,)((\varphi_k - U_0)/(\varphi_k - U))$следует, что плавный переход обладает малым значением K_c. Резкие p-n переходы и ДБШ обеспечивают $K_c \sim 2..4$. Наиболее высокие значения K_c до 10..15 обеспечивают диоды со сверхрезким p-n переходом (y = 1), в n-базе которого концентрация донорной примеси уменьшается при удалении от границы перехода (рис.3.2). Добротность настроечных диодов $Q = [2 * \pi * f * C_б(U_0) * r_s]^{-1}$ зависит от материала и типа перехода, а также от частоты и напряжения смещения. Диоды на основе GaAs благодаря более высокой подвижности носителей имеют большую добротность, чем диоды из кремния, но у них меньше $U обр\ макс$. Добротность диодов со сверхрезким p-n переходом в несколько раз ниже, чем у обычных диодов из-за большего сопротивления широкой низколегированной n-базы диода (рис.3.5).

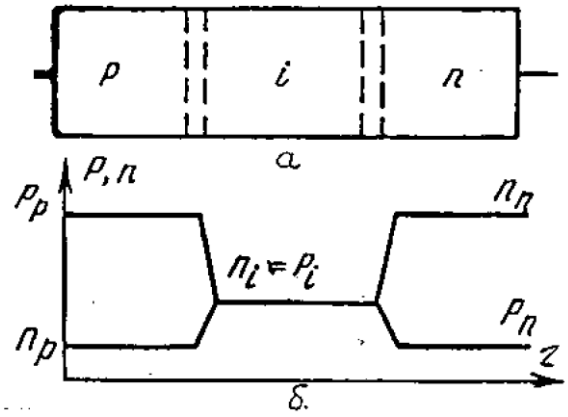
Добротность настроечных диодов характеризует потери мощности в диоде и определяет степень связи диода с резонансной системой. Очевидно, что более добротный настроечный диод можно сильнее связать с резонансной системой и получить при этом больший диапазон перестройки при меньшем изменении выходной мощности перестраиваемого генератора.

35. Переключательные диоды

Переключательные диоды предназначены для управления уровнем и (или) фазой СВЧ сигналов, а также коммутации СВЧ мощности в линиях передачи. Принцип действия таких диодов основан на резком изменении полного сопротивления при изменении полярности управляющего напряжения или тока. В переключательных диодах используются в основном кремниевые p-i-n структуры (рис.3.6,а), находят также применение структуры с p-n переходом. В p-i-n диоде между сильно легированными областями с дырочной и электронной проводимостью находится i-область с концентрацией носителей, близкой к концентрации p и n в собственном полупроводнике (рис.3.6,б). Концентрация носителей в p-области p_p и n_p, а в n-области n_n и p_n.

При подаче прямого напряжения в i-область одновременно инжектируются дырки из p-области и электроны из n-области. Сопротивление i-области и всего диода становится малым, единицы, доли ома.

При обратном напряжении дырки и электроны экстрагируются из i-области в p-и n-области соответственно, что и приводит к увеличению сопротивления iобласти и всего диода до десятков килоом в диапазоне СВЧ. Емкость диода, определяемая в основном шириной i-области, изменяется незначительно.



В мощных p-i-n диодах ширина i-области делается большой (0,1..0,5 мм), это позволяет работать при больших амплитудах напряжения на диоде (свыше 1 кВт) и импульсной мощности более 10 кВт. Большая ширина i-области дает возможность увеличить площадь сечения диода без существенного увеличения емкости, улучшить теплоотвод и поднять среднюю рабочую мощность. Рисунок 3.6 Сопротивление p-i-n диода при прямом включении плавно изменяется при изменении тока через диод, что позволяет использовать p-i-n диоды в аттенюаторах СВЧ.

Следует заметить, что p-i-n диоды применяются как при малых уровнях мощности, так и на больших мощностях, достигающих сотен ватт в непрерывном режиме и сотен киловатт в импульсном. При этом мощность управления диодом может быть значительно меньше СВЧ мощности в линии передачи. При низких уровнях мощности функции p-i-n диодов способны выполнять диоды с p-n переходами, а также ДБШ, которые обладают большим быстродействием.

36. Лавинно-пролетные диоды (ЛПД)

Лавинно-пролетный диод (ЛПД) - это прибор с динамическим отрицательным сопротивлением, которое является следствием двух происходящих в диоде процессов: лавинного пробоя, сопровождающегося образованием большого числа свободных электронов и дырок; дрейфа (пролета) носителей в полупроводнике под действием электрического поля.

ЛПД представляют собой полупроводниковую структуру, состоящую из ряда областей, отличающихся типом и концентрацией атомов примеси (уровнем легирования). Для изготовления ЛПД применяют чаще всего кремний или арсенид галлия. В зависимости от последовательности расположения областей можно выделить несколько видов ЛПД, например: двухслойные диоды n-p типа, трехслойные p+-n-n+ типа, четырехслойные n+-p-i-p+ типа или диоды Рида, М-п-п+ типа (с барьером Шотки).

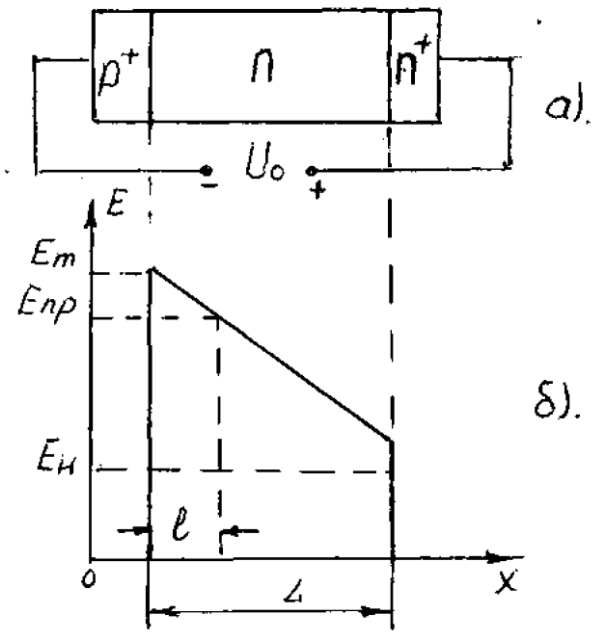


Рис. 3.7

Широкое распространение получили ЛПД с трехслойной структурой p^+-n-n+ типа, показанной на рис.3.7,а. Сильно легированные области структуры p+, n+ с концентрацией примеси Na,Nd = 10 см являются по существу контактами прибора. Концентрация примеси в n-области ниже (Nd = $10^{15}..10^{16}$ $см^{-3}$), поэтому переход p^+-n оказывается несимметричным, запорный слой полностью располагается в n-области. Распределение напряженности электрического поля в такой структуре изображено на рис.3.7,б.

При некоторой величине обратного напряжения U0, приложенного к диоду, напряженность электрического поля может превысить значение Eпр = 10^5 В/см, соответствующее началу лавинного пробоя в небольшой области запорного слоя шириной l (рис.3.7,а), в связи с чем весь запорный слой p+-n перехода шириной L разделяется на две области: узкую область шириной l < L/3, в которой происходит процесс ударной ионизации и умножения (лавинообразного увеличения) числа носителей, так называемый слой умножения, и область дрейфа (пролета) носителей шириной (L - l), где происходит движение носителей, образовавшихся в слое умножения. Дрейф носителей происходит с постоянной скоростью $V_{нас} = 10^7$ см/с, так как напряженность электрического поля в области дрейфа обычно выше значения Eнас = 5..10 кВ/см, при превышении которого скорость дрейфа носителей не зависит от величины напряженности электрического поля.

Ток анода при напряжениях, близких к пробивному Uo очень сильно зависит от приложенного напряжения (рис 3.8). Если не принять мер по ограничению тока, то лавинный пробой перейдет в тепловой, и в результате этого диод выйдет из строя. Поэтому для питания ЛПД необходимо использовать источник стабильного тока. Следует отметить, что вольт- амперная характеристика ЛПД не имеет участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Необходимое для генерирования колебаний СВЧ отрицательное сопротивление может быть обеспечено только в результате использования динамических свойств пространственного заряда подвижных носителей - дырок и электронов.

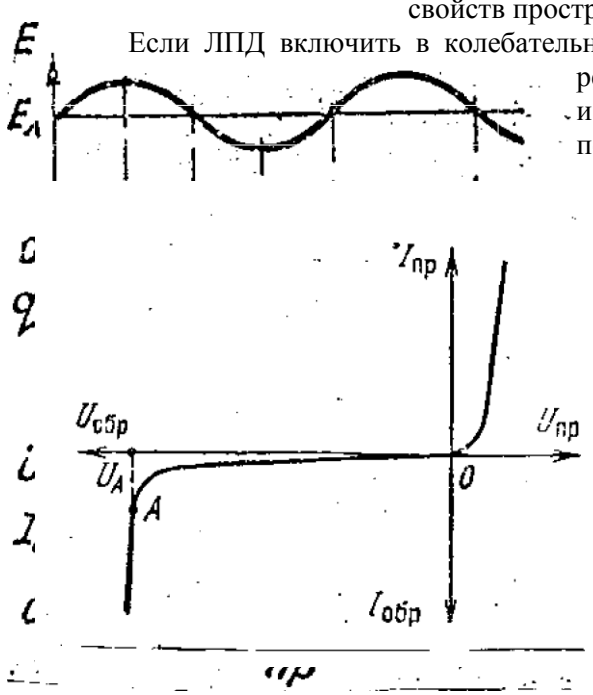


Рис. 3.8

Если ЛПД включить в колебательный контур (резонатор), то при установившихся колебаниях в резонаторе к диоду будет приложено постоянное напряжение U_0 и высокочастотное переменное напряжение u(t) = U_{1m}sin(wt) с постоянной амплитудой U_{1m} < U_o. Электрическое поле в $p^+ - n$ переходе будет (рис.3.9,а)

E = Eпр + E_1sin(wt).

В положительные полупериоды ϰE в переходе происходит генерирование электронно-дырочных пар, при этом с увеличением ϰE растет скорость генерации носителей (количество новых носителей, создаваемых одним электроном или дыркой в результате лавинного пробоя в единицу времени), поскольку количество генерируемых носителей зависит не только от скорости генерации носителей, но и от количества частиц, осуществляющих ионизацию, число которых продолжает расти пока

E > $E_{пр}$. Наибольшее количество носителей обоих типов в переходе получается к концу положительного процесс

ударной ионизации прекращается (рис.3.9,б). Дырки уходят из слоя умножения в p^+-область, а электроны, чтобы попасть в n^+ - область, должны пройти через область дрейфа (L - l).

В течении всего времени пролета носителей $\tau = (L - l)/V$нас во внешней цепи диода наводится ток, совпадающий по направлению с дрейфовым (конвекционным) током движущих в приборе электронов. На рис.3.9,в показаны графики наведенного тока i(t), постоянной сое- тавляющей I_0, первой гармоники тока i1(t) для такой частоты колебаний $f_0 = 1/T_0$, для которой $\tau_{пр} = \frac{T_0}{2}$.

а)

Сравнивая графики (рис.3.9,а,в) видим, что первая гармоника тока $i_1(t)$ находится в противофазе с напряжением $u_1(t)$, следовательно ЛПД обладает отрицательным сопротивлением по частоте f_0. Это является результатом инерционности процессов в ЛПД: максимум заряда q_M запаздывает относительно напряжения U_1 на τt_1 $T_0/4$, а максимум тока $i_1(t)$ запаздывает относительно момента окончания процесса лавинного умножения на $t_2 = \frac{\tau_{пр}}{2} \sim \frac{T0}{4}$. В итоге полное время запаздывания тока i_1 относительно напряжения U_1:

$$\tau t = \tau t1 + \tau t2 = T/2.$$

Если считать, что при $f > f_o$ время пролета носителей остается неизменным $\tau_{пр} = T_0/2 = const$, а $\tau t_1 = T/4$ (где T = 1/f), тогда импульс наведенного тока, начавшись в момент $t_1 = T/2$, закончиться при t > T, $\tau t_2 > T/4$, и сдвиг начальной фазы тока i относительно U_1 превысит π (рис.3.10,а,б). Векторная диаграмма для этого случая соответствует рис.3.10,б, первая гармоника наведенного тока будет содержать две составляющие: активную i_{1a}, противофазную переменному напряжению $U_1(t)$, и реактивную i_{1p} емкостного характера.

В общем случае ЛПД можно характеризовать средней по первой гармонике комплексной проводимостью

$$Y_{cp}=G_{cp} + jB_{cp} \qquad (3.11)$$

или средним по первой гармонике комплексным сопротивлением

$$Z_{cp} = r_{cp} + jX_{cp}. \qquad (3.12)$$

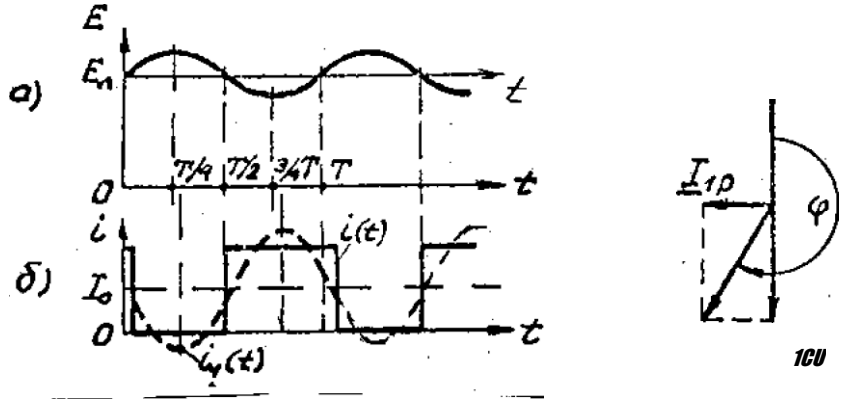


Рис.3.10

Рассмотренный режим работы ЛПД называется пролетным или IMPATT режимом и является наиболее распространенным.

37. Генераторы на лавинно-пролетном диоде (ГЛПД)

Принцип действия ГЛПД во многом аналогичен принципу действия других СВЧ генераторов. Он состоит в том, что в одной части прибора (в области p+-n перехода ЛПД) происходит модуляция электронного потока по плотности (образования электронных сгустков), а в другой (в области дрейфа) -осуществляется передача энергии от этого сгустка электромагнитному полю резонатора, в который включен ЛПД.

Конструкция ГЛПД определяется в основном диапазоном рабочих частот. Устройства ГЛПД радиальноволноводной конструкции, получили широкое применение в миллиметровом диапазоне. В такой конструкции частота генерируемых колебаний ГЛПД определяется в основном диаметром диска D и его расстоянием h от нижней стенки волновода. Перемещение короткозамыкающего поршня (изменение L) существенно сказывается на выходной мощности генератора и меньше на частоте (рис.3.12).

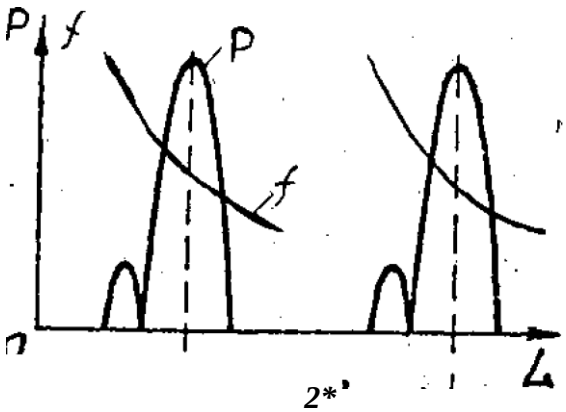


Рис.3.12

При перемещении короткозамыкающего поршня на расстояние $\Delta L = X_в/2$, где $X_в$ - длина волны в волноводе, нагрузка на контактах ЛПД не изменяется, поэтому мощность и частота остаются прежними.

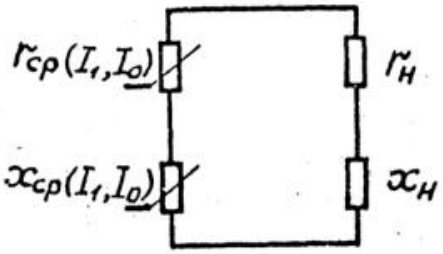


Рис. 3.13

На рис.3.13 изображена эквивалентная схема генератора, в которой ЛПД характеризуется средним по первой гармонике комплексным сопротивлением Zср, = $r_{ср}$ + jXср, а нагрузка последовательным соединением активного и реактивного сопротивления $Z_н = r_н + jX_н$. Параметры нелинейной части схемы - диода сильно зависят от режима его работы (от тока питания I_o и первой гармоники т.е $r_{ср}$(I0,I1) и Xср(I0,I1) и значительно слабее от частоты w, а параметры нагрузки, составляющей линейную часть схемы, сильно зависят от частоты колебаний: $r_н$(w), Xн(w).

Стационарный режим колебаний можно определить из условия баланса активных и реактивных сопротивлений

$r_{ср}$(I0,I1) + $r_н$(w) = 0, (3.13)

Xср(I0,I1)+ Xср(w)= 0. (3.14)

Условие (3.14) эквивалентно условие баланса фаз генератора и определяет частоту генерируемых колебаний. Из него следует, что всякое изменение режима работы диода (изменение тока питания I_o или амплитуды I1 первой гармоники тока) изменяет $X_{ср}$; условие (3.14) выполняется теперь при другом значении Xср, а значит и при другой частоте колебаний, автоматически устанавливающейся в генераторе. Обращаясь к условию (3.13) баланса активных сопротивлений, отметим, что поскольку $r_н > 0$, в стационарном режиме обязательно должно быть $r_{ср} < 0$. Мощность первой гармоники, отдаваемой нелинейным элементом, определяется выражением $P1 = 0{,}5|r_{ср}|I_1^2$.

Из условия (3.13) следует, что при изменении $r_н$ автоматически изменяются I_1 (при постоянстве I_o), а значит и P_1. При некоторой оптимальной нагрузке $r_{опт}$ достигается максимальная мощность $P_{1макс}$. Изменение I_o также приводит к изменению амплитуды I_1 и мощности P_1: обычно при увеличении I_o возрастает U1 и I1 (рис.3.9), причем U1 возрастает значительнее, поэтому величины $r_{ср}=U_1/I_1$ и P_1 также увеличиваются. На рис.3.14,а показаны зависимости $P_1(r_н)$, а на рис.3.14,б зависимость $P_1(I_0)$.

В элементах схемы генератора (диоде, резонаторе, нагрузке) имеются потери энергии. Самовозбуждение колебаний в таком генераторе может происходить только в том случае, если при малых амплитудах колебаний энергия, отдаваемая отрицательным сопротивлением, больше энергии, потребляемой положительным сопротивлением $r_н$, т.е. если $|r_д(I0,I1 \sim 0)| > r_н$.

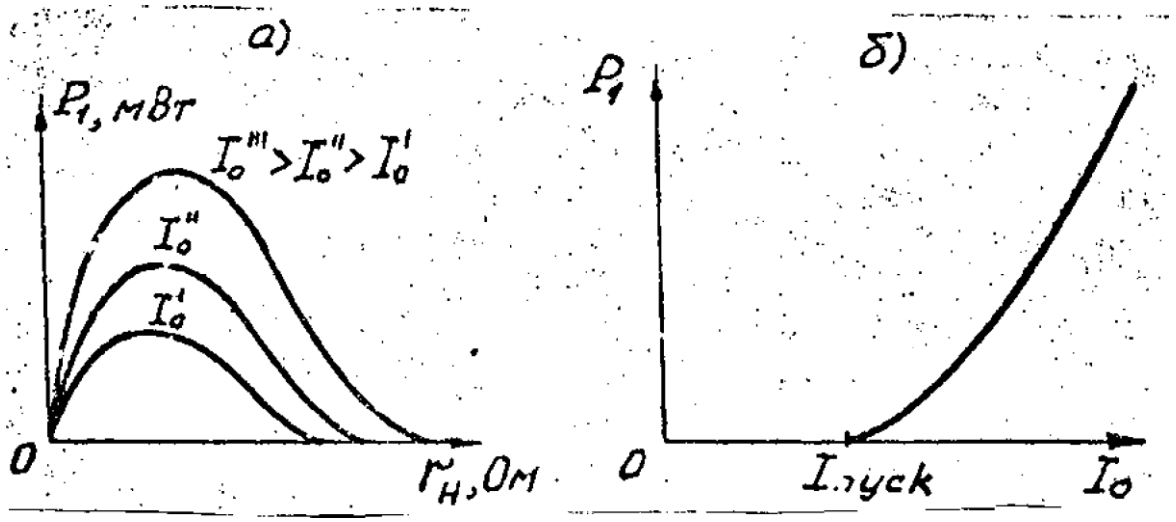


Рис.3.14

Минимальный ток I_o, при котором происходит возбуждение колебаний в генераторе, называется пусковым током $I_{пуск}$ (рис.3.14,б). Очевидно, при изменении нагрузки $г_н$ изменяется величина $I_{пуск}$.

ЛПД могут быть использованы и в регенеративных усилителях отражательного типа при токах диода меньших пускового. Вследствие относительно высокого уровня шумов, ЛПД используют в основном в усилителях мощности. Коэффициент усиления обычно составляет 8..15 дБ при полосе 1...10 % на один каскад. Максимальная выходная мощность усилителя примерно соответствует максимальной выходной мощности генератора на том же диоде.

ЛПД обеспечивают получение мощностей в широком диапазоне частот (0,5...200 ГГц). На их основе реализуется генераторы с выходными мощностями до 5... 10 Вт на 10 ГГц, до 0,5... 1 Вт на 100 ГГц с высоким КПД, достигающим 1 0 … 3 0 % на 10 ГГц. ЛПД являются наиболее мощными полупроводниковыми приборами СВЧ.

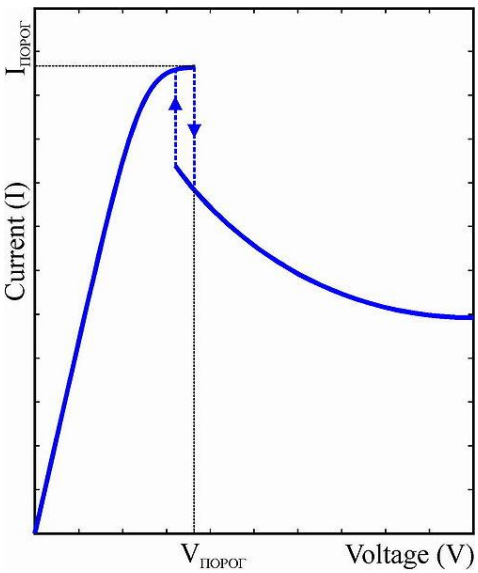
38. Диоды Ганна

Диоды Ганна - тип полупроводниковых диодов, использующийся для генерации и преобразования колебаний в диапазоне СВЧ. В отличие от других типов диодов, принцип действия диода Ганна основан не на свойствах p-n-переходов, а на собственных объёмных свойствах полупроводника.

Традиционно диод Ганна состоит из слоя арсенида галлия толщиной от единиц до сотен микрометров с омическими контактами с обеих сторон. В этом материале в зоне проводимости имеются два минимума энергии, которым соответствуют два состояния электронов — «тяжёлые» и «лёгкие». В связи с этим с ростом напряжённости электрического поля средняя дрейфовая скорость электронов увеличивается до достижения полем некоторого критического значения, а затем уменьшается, стремясь к скорости насыщения.

Таким образом, если к диоду приложено напряжение, превышающее произведение критической напряжённости поля на толщину слоя арсенида галлия в диоде, равномерное распределение напряжённости по толщине слоя становится неустойчиво. Тогда при возникновении даже в тонкой области небольшого увеличения напряжённости поля электроны, расположенные ближе к аноду, «отступят» от этой области к нему, а электроны, расположенные у катода, будут пытаться «догнать» получившийся движущийся к аноду двойной слой зарядов. При движении напряжённость поля в этом слое будет непрерывно возрастать, а вне его — снижаться, пока не достигнет равновесного значения. Такой движущийся двойной слой зарядов с высокой напряжённостью электрического поля внутри получил название домена сильного поля, а напряжение, при котором он возникает — порогового.

В момент зарождения домена ток в диоде максимален. По мере формирования домена он уменьшается и достигает своего минимума по окончании формирования. Достигая анода, домен разрушается, и ток снова возрастает. Но едва он достигнет максимума, у катода формируется новый домен. Частота, с которой этот процесс повторяется, обратно пропорциональна толщине слоя полупроводника и называется пролетной частотой.



При помещении диода Ганна в резонатор возможны другие режимы генерации, при которых частота колебаний может быть сделана как ниже, так и выше пролетной частоты. Эффективность такого генератора относительно высока, но максимальная мощность не превышает 200—300мВт.

Наряду с арсенидом галлия для изготовления диодов Ганна также используется фосфид индия (до 170 ГГц) и нитрид галлия (GaN) на котором и была достигнута наиболее высокая частота колебаний в диодах Ганна — 3 ГГц.

Эффе́кт Га́нна —явление возникновения осцилляций тока (~ 10^9—10^{10} Гц) в однородном многодолинном полупроводнике при приложении к нему сильного электрического поля.

Эффе́кт Га́нна может возникнуть в полупроводнике, в котором в зоне проводимости имеется более одного минимума энергии (второй закон дисперсии с небольшим энергетическим расстоянием до основного минимума), например в GaAs, InAs. В полупроводниках, зона проводимости которых имеет более одного минимума энергии, электрон с волновым вектором k, соответствующим одному из минимумов, при рассеянии может оказаться в состоянии с волновым вектором k', принадлежащим другому минимуму. В результате такого рассеяния будет иметь место переброс электронов из одного минимума зоны проводимости в другой. Такой вид рассеяния получил название междолинного.

Рассмотрим энергетическую структуру GaAs n-типа в направлении [100]. Возможны переходы из минимума А с состоянием k в минимум Б с состоянием k'. Минимумы А и Б разделены энергетическим интервалом ΔE = 0,36 эВ. Поскольку кривизна долин А и Б разная, эффективные массы электронов в них также различны и равны и соответственно.

Естественно, $m_1^* = 0,068m_0$ $m_2^* = 1,2m_0$ подвижность легких $\mu_B \approx 100 \div 200\frac{cm^2}{V \cdot s}$ $1000 \div 8000\frac{cm^2}{V \cdot s}$

электронов выше, чем подвижность тяжелых электронов .

Плотность состояний в верхней долине примерно в 70 раз выше, чем в нижней.

При малых внешних полях электроны находятся в термодинамическом равновесии с решеткой и, поскольку при обычных температурах k0T < < ΔE, электроны в основном занимают энергетические состояния вблизи минимума А. Плотность тока:

$$j = en_A\mu_A E$$

определяется концентрацией легких электронов и их подвижностью. В этом случае концентрация электронов $n_0=n_A, n_B=0$. Плотность тока будет линейно возрастать с ростом напряженности поля до некоторого критического значения Еа.

По мере возрастания Е средняя энергия и скорость электронов повышается, и при Е > ΔE становится возможным переход электронов в долину Б. Тогда суммарная концентрация электронов будет $n_0 = n_A + n_B$. Таким образом с ростом напряженности от E_a до некоторого значения $E_б$ будет иметь место уменьшение подвижности электронов, а следовательно, уменьшение j, и на ВАХ появится падающий участок. При дальнейшем росте E(E > Еб) все электроны перейдут в минимум Б, и снова установится линейная ВАХ. n0 = nB, nA = 0.

39. Автогенераторы на диодах Гана. Конструкции, эквивалентная схема. Режимы работы. параметры генераторов, области применения

Явление возникновения колебаний тока в однородном образце n-GaAs было обнаружено Дж. Ганном в 1963 г. и до сих пор часто называется эффектом Ганна. Для GaAs $V_{нас} = 10^7$ см/с, поэтому частота колебаний тока в образце (пролетная частота) равна:

$f_{пр}> = 1/T = 100/L,$ (3.21)

где $f_{пр}$ получается в гигагерцах, если L выражена в микрометрах, например, при L = 10 мкм, $f_{пр}$ = 10 ГГц.

Простейшим генератором СВЧ могла бы быть цепь, в которой последовательно включены ДГ, нагрузочное сопротивление и источник постоянного напряжения. Такой режим работы ДГ называется пролетным. На практике он не получил распространения из-за низкого КПД, невозможности управления частотой.

Обычно генераторы на ДГ (ГДГ) представляют собой объемный резонатор, в соответствующем месте которого помещается диод Ганна. В этом случае на постоянное напряжение источника питания накладывается СВЧ напряжение резонатора, которое будет оказывать влияние на процессы образования пространственного заряда. Частота колебаний ГДГ будет определяться резонатором и может значительно отличаться от пролетной частоты диода.

Конструкция генератора на диоде Ганна определяется в основном диапазоном частот. На рис.3.19 приведена одна из возможных конструкций ГДГ волноводного типа.

Колебательная система генератора образована короткозамкнутым отрезком волновода. Расстояние между диодом и короткозамкнутой стенкой волновода определяет частоту колебаний генератора. Питающее напряжение подается через емкостный фильтр, предотвращающий попадание СВЧ-колебаний в цепь питания. Конструкция генератора должна обеспечивать отвод тепла от диода. Диапазон механической перестройки частоты достигает половины октавы. Электронная перестройка мала - типичная величина составляет 5.. .90 МГц/В.

ГДГ обеспечивают получение мощностей в широком частот (5...100 ГГц), выходная мощность достигает нескольких сотен милливатт. Достоинствами ГДГ являются: малый уровень амплитуды и частотных шумов, низкая величина питающего напряжения U0,10 В. Недостатком ГДГ является сравнительно низкое значение КПД, равное 1... 4 %.

ГДГ широко используются в качестве гетеродинов приемников, возбудителей передатчиков, источников накачки параметрических усилителей и т.п.

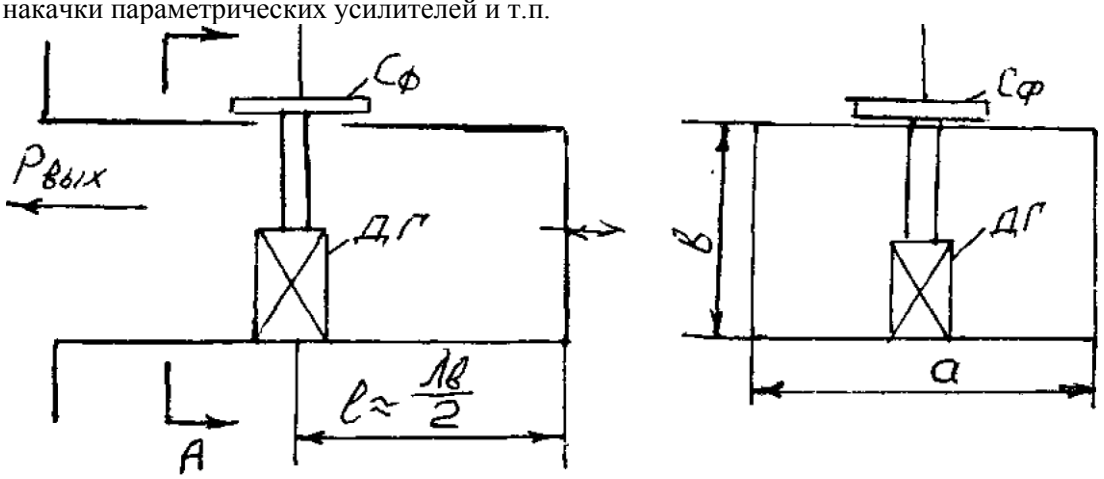


Рис.3.19

Эквивалентные схемы генераторов на диодах Ганна.

Генератор на диоде Ганна представляет собой колебательную систему (резонатор) с установленным в ней диодом Ганна. Эквивалентная схема генератора должна включать эквивалентные схемы диода, колебательной системы и нагрузки.

Диод Ганна может быть представлен обычной эквивалентной схемой СВЧ диода (рис. 7.10, а). На этой схеме последовательное сопротивление r, индуктивность выводов L и емкость корпуса Ск зависят от конструкции элементов структуры и ее свойств, а отрицательное активное сопротивление диода - R и емкость Сд зависят еще и от режима питания диода.

При известных параметрах эквивалентной схемы диода и частоте эта схема может быть пересчитана в простую двухэлементную последовательную цепочку (рис. 7.10, б) или параллельную цепочку (рис. 7.10, в).

Эквивалентная схема генератора может быть представлена в двух вариантах - в виде последовательной эквивалентной схемы или параллельной.

В последовательной эквивалентной схеме (рис. 7.11, а):

-Rд , Xд - элементы эквивалентной схемы диода Ганна (рис. 7.10, б);

L, C, R - элементы колебательной системы;

R¢ н - эквивалентное (с учетом связи) сопротивление нагрузки.

Генерация возможна, если |-Rд | ³ R + R¢ н

В параллельной эквивалентной схеме (рис. 7.11, б):

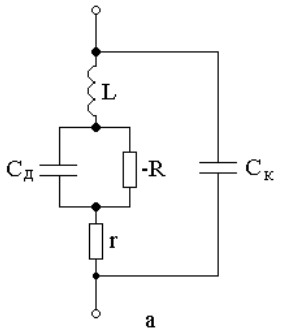
-Gд, Bд - элементы эквивалентной схемы диода Ганна (рис. 7.10, в);

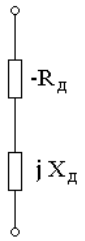
L, C, G - элементы колебательной системы;

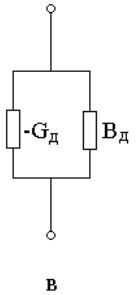
G¢ н - эквивалентная проводимость нагрузки.

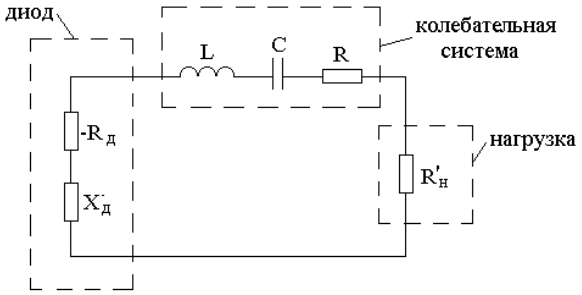
Генерация возможна, если |-Gд | ³ G + G¢ н.

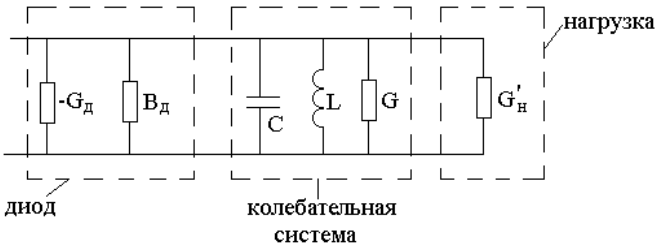
Приведенные эквивалентные схемы являются упрощенными и могут использоваться для частот не свыше 10 ¸ 11 ГГц.











40. Биполярные СВЧ транзисторы (БПСВЧ)

Современные БПСВЧ транзисторы изготавливают по планарно-эпитаксиальной технологии. В маломощных (малошумящих) БПСВЧ транзисторах используются германиевые p-n-p и все чаще кремниевые n-p-n структуры. Генераторные БПСВЧ транзисторы имеют исключительно кремниевые n-p-n структуры, так как большая ширина запрещенной зоны кремния позволяет повысить максимально допустимую температуру и пробивное напряжение переходов транзистора, что способствует увеличению выходной мощности транзистора. Более высокая подвижность электронов, чем дырок, в кремнии (1300 и 470 см /(В*с) соответственно) обеспечивает меньшее время их дрейфа через базу с дырочной проводимостью, а значит и более высокую рабочую частоту.

Частотный диапазон биполярного транзистора ограничивается временем переноса носителей заряда через транзистор, которое определяет постоянную времени задержки сигнала от эмиттера до коллектора

$$\tau_{эк} = \tau_э + \tau_б + \tau_{к.п.} + \tau_к \qquad (3.22)$$

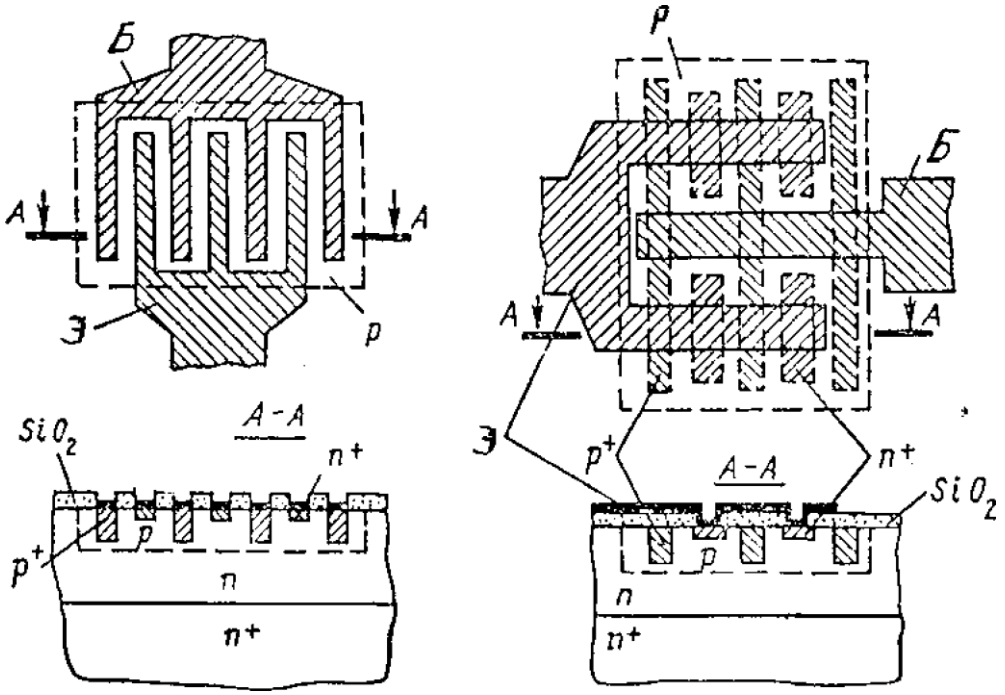
где $\tau_э$ - время зарядки емкости эмиттерного перехода; $\tau_б$ - время пролета носителей заряда через базовую область; $x_{кп}$. - время пролета обедненной области коллектора; $\tau_к$ - время зарядки емкости коллекторного перехода.

В СВЧ транзисторах уменьшение постоянной времени $\tau_{эк}$ в первую очередь достигается уменьшением значения $\tau_б$, для чего необходимо уменьшать толщину базовой области транзистора. Современная технология позволяет получать транзисторы с толщиной базы до десятых долей микрометра. Наличие сверхтонкой базы является одной из особенностей конструкции БПСВЧ транзистора.

Сокращение времени переноса носителей через базу возможно не только за счет уменьшения толщины базы, но и за счет обеспечения дрейфового характера движения носителей в базе. Дрейфовая скорость может существенно превышать скорость диффузионного движения, если создать в базе внутреннее ускоряющее поле, для этого в базе создают неоднородное распределение примесей например для базы p-типа обеспечивают экспоненциальное уменьшение концентрации акцепторной примеси в направлении коллектора.

Следует отметить, что при уменьшении толщины базы снижается значение предельно допустимого обратного напряжения коллектор-база, а это ведет к уменьшению выходной мощности транзистора, росту сопротивления базы в поперечном направлении, служащего источником нежелательной обратной связи в транзисторе. Для повышения выходной мощности транзистора необходимо иметь большее поперечное сечение транзисторной структуры, что позволяло бы работу с большими амплитудами тока коллектора. Однако увеличение площади переходов ведет к росту емкости эмиттера и коллектора и ухудшения частотных свойств транзистора. Устранение подобных противоречий достигается использованием планарно-эпитаксиальной конструкции транзистора и особой топологии эмиттерного и базового электродов. Типичные структуры современных БПСВЧ транзисторов приведены на рис.3.20.

Гребенчатая структура (рис.3.20,а) используется в маломощных малошумящих СВЧ транзисторах, в более



oj____ _____

5}

мощных транзисторах находит применение многоэмиттерная структура (рис 3.20,б).

С целью увеличения выходной мощности и улучшения теплоотвода в БПСВЧ транзисторах используется объединение в одном кристалле большого числа единичных структур (до 150), включаемых параллельно, и нескольких кристаллов в одном корпусе. Серьёзным недостатком таких транзисторов являются очень низкие значения входного и выходного сопротивлений, затрудняющие согласование их с источником сигнала и нагрузкой.

Особенностью конструкций СВЧ транзисторов является использование ленточных выводов, удобных для соединения с микрополосковыми линиями передачи, отсутствие внешнего металлического корпуса, что позволяет уменьшить паразитные ёмкости и индуктивности. Широко используются бескорпусные конструкции для маломощных транзисторов.

С увеличением частоты коэффициент усиления транзистора изменяется. БПСВЧ транзисторы, как правило, применяют в той области частот, где усиление падает с ростом частоты, со скоростью примерно 6 дБ/октава (рис.3.21,а).

Частотные свойства транзисторов обычно характеризуют с помощью нескольких характеристических частот: максимальной частоты генерации f_{max}, предельных f_{h21} и граничной f_T частот. Частоту f_{max} определяют как наибольшую, на которой способен генерировать транзистор в схеме автогенератора. На этой частоте коэффициент усиления по мощности уменьшается до единицы (K_p=0дБ).

Предельными называют частоты f^b или fp и fh2i6 или f_a , на которых модули коэффициентов передачи тока в схеме с общим эмиттером (ОЭ) п21э и
в схеме с общей базой (ОБ) $п_{21б}$ уменьшаются в **V**2 раэа (на 3 дБ) по сравнению с их значениями на ниэкой частоте p_o и a_o (рис.3.21,б).

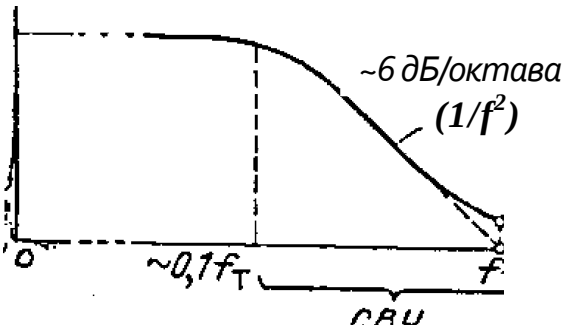
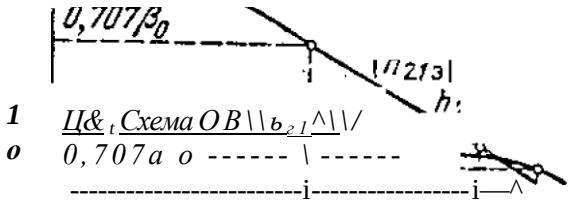


Схема ОЭ



б)

Рис.3.21

Связь между f_b и f_a выражается формулой

$f_b/f_a = 1 - a_0$. (3.23)

В области частот $f > (3..4)f_b$ произведение $|B|*f$ постоянно, поэтому часто используют параметр f_T граничная частота усиления по току - частота на которой $|B| = 1$: $f_T = |B|*f = |h_{21э}|f$. (3.24)

Граничную частоту практически определяют таким образом: на стандартной частоте $f_{изм}$ (одной из ряда 100, 300, 1000, 3000 МГц), в районе которой модуль $h_{21э}$ падает примерно на 6 дБ/октаву, измеряют $|h_{21э}|$ и рассчитывают f_T по формуле (3.24). Ее значение может составлять 10..15 ГГц. По определению

$f_T = f_b * B_0/\sqrt{2} = f_a * a_0/\sqrt{2}$ (3.25)

В схеме с ОБ граничная частота может быть определена соотношением

$f_T = 1/(2\pi\tau_{эк})$, (3.26)

где $\tau_{эк}$ - постоянная времени задержки сигнала от эмиттера до коллектора (3.22).

Максимальная частота генерации $f_{макс}$ является наиболее объективным критерием эффективности работы транзистора на СВЧ, так как коэффициент усиления по мощности транзисторного усилителя при согласовании входа и выхода можно подсчитать по формуле:

$Kp = (f_{макс}/f)^2$. (3.27)

Значение $f_{макс}$ зависит от параметров эквивалентной схемы транзистора

$$f_{макс} = \sqrt{a_0 * \frac{f_a}{30*r_b*C_k}} = \sqrt{\frac{f_T}{8*\pi*r_b*C_k}} \quad (3.28)$$

где $r_б C_к$ - постоянная времени коллекторной цепи, f_a выражена в МГц, а $f_{макс}$ - в ГГц.

Для увеличения значения $f_{макс}$ необходимо принимать меры, обеспечивающие снижение $r_б$ и $C_к$, а также увеличивающие f_a , однако такие требования к конструкции транзистора и его электрическим параметрам оказываются противоречивыми и не могут быть улучшены одновременно.

Значение $f_{макс}$ может достигать 10..20 ГГц. На частотах, превышающих $f_{макс}$, транзистор перестает быть активным прибором, т.е. только поглощает входной сигнал. Генерация или усиление в этом случае невозможны ни при каких схемах включения. Обычно БПСВЧ транзисторы используют на частотах в 1,5.. .2 раза ниже $f_{макс}$

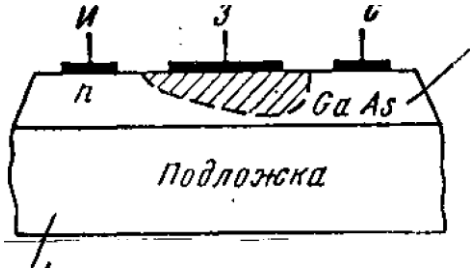
Важным параметром маломощных БПСВЧ транзисторов является коэффициент шума - $K_ш$. В биполярных транзисторах СВЧ имеют место два типа шумов: дробовой шум обусловлен флуктуациями количества инжектируемых в базу неосновных носителей заряда в единицу времени и флуктуациями диффузионного процесса (не все инжектируемые носители достигают коллектора). Величина дробового шума зависит от величины рабочего тока транзистора. Тепловой шум обусловлен сопротивлением базы $r_б$ транзистора. Коэффициент шума возрастает с ростом частоты со скоростью примерно 1...3 дБ/октава. Шумы тем больше, чем больше напряжение на коллекторе и ток эмиттера. Минимум $K_ш$ достигается при токах эмиттера, в несколько раз меньших, чем максимум усиления. Коэффициент шума Кш имеет минимальное значение при некотором оптимальном значении внутреннего сопротивления источника сигнала. Коэффициент шума практически не зависит от схемы включения транзистора. В диапазоне частот 0,5.. 10 ГГц коэффициент шума маломощных БПСВЧ транзисторов лежит в пределах $K_ш$ = 1,5...4 дБ, а коэффициент усиления Кр = 3 … 1 0 дБ.

Мощные БПСВЧ транзисторы обладают сравнительно низким значением коэффициента усиления мощности Кр = 3 … 1 0 дБ, но по сравнению с другими полупроводниковыми приборами СВЧ отличаются высокой эффективностью преобразования энергии. КПД мощных БПСВЧ транзисторов в низкочастотной части СВЧ диапазона составляет десятки процентов (60...70%) и с ростом частоты падает до 15...20 %. Чем мощнее транзистор, тем ниже его предельная частота, что связано с увеличением емкости коллекторного перехода. Мощные БПСВЧ транзисторы с рабочими частотами выше 1 ГГц выпускают, как правило, для включения по схеме с ОБ. При таком включении верхняя рабочая частота транзистора может превышать f_T, усиление мощности больше, чем в схеме с ОЭ (см. рис.3.21,б).

Транзисторы СВЧ не принято характеризовать гибридными h-параметрами из-за трудностей обеспечения режимов короткого замыкания и холостого хода при их измерении на СВЧ из-за сильного влияния паразитных индуктивностей и емкостей. В диапазоне СВЧ используется система S-параметров, в которой транзистор представляется в виде четырехполюсника включенного в линию передачи с волновым сопротивлением Z_0, согласованную с источником сигнала и нагрузкой.

41. Полевые СВЧ транзисторы

Полевые транзисторы (ПТ) различаются по способу управления потоком основных носителей заряда, движущихся в полупроводниковом канале. Они могут иметь изолированный затвор, затвор на основе p-n-перехода или затвор на основе барьера Шотки. ПТ с изолированным затвором из-за наличия МОП-структуры имеют невысокие граничные частоты и используются только в ДМВ диапазоне. ПТ с p-n-переходом не позволяют существенно увеличивать уровень мощности вследствие низких допустимых напряжений и малой площади поверхности отводящей тепло.



Наиболее широкое применение на СВЧ находят ПТ в которых в качестве затвора используется барьер Шотки (ПТШ). Поперечный разрез структуры ПТ с барьером Шотки изображен на рис.3.22. ПТШ СВЧ изготавливаются из GaAs n-типа по планарно-эпитаксиальной

Рис. 3.22

В таких транзисторах в высокоомной подложке 1 из GaAs, создается эпитаксиальный проводящий канал 2 n-типа, подсоединенный с помощью омических контактов к выводам истока И и стока С. Затвор 3 расположенный между истоком и стоком, имеет обычно конфигурацию замкнутого кольца или квадрата. Барьер Шотки получают нанесением металлического слоя (золото-хром, алюминий-германий) на поверхность канала n-типа. При подаче напряжения между стоком и истоком через n-канал протекает электронный ток, величина которого изменяется напряжением, прикладываемым к затвору. Повышение обратного смещения на электроде затвора вызывает увеличение ширины обедненной области под затвором (на рис.3.22 эта область заштрихована) и тем самым сужение n-канала, при этом возрастает сопротивление n-канала и уменьшается ток стока. Таким образом, осуществляется модуляция электронного потока в n-канале с помощью внешнего управляющего напряжения.

Одним из основных факторов, определяющих частотные свойства ПТШ, является время пролета носителей заряда в канале

$$\tau = L/Vn, \qquad (3.29)$$

где L - длина канала, V_n - дрейфовая скорость насыщения носителей заряда в канале.

Максимальная частота генерации $f_{макс}$ для ПТШ определяется выражением

$$f_{макс}=1/(2\pi\tau) = Vn/(2\pi L). \qquad (3.30)$$

Очевидно, что для улучшения частотных свойств ПТШ необходимо обеспечить малую длину канала и большую дрейфовую скорость насыщения. Основным материалом для изготовления ПТШ служит арсенид галлия скорость движения электронов в котором примерно в 2 раза выше, чем в кремнии. Длину канала L стремятся уменьшить до значений, определяемых возможностями технологии (L = 1 … 2 мкм) при этом ток прибора и отдаваемую мощность можно повысить за счет увеличения ширины канала и созданием многоканальных структур, состоящих из нескольких единичных структур размещенных на одной подложке и соединенных параллельно. Сравнительно малая емкость обратно смещенного барьера Шотки затвора способствует достижению более высоких рабочих частот по сравнению с транзисторами - до 9 0 … 1 2 0 ГГц. ПТШ имеют и другие преимущества по сравнению с биполярными транзисторами. Благодаря более простой и совершенной технологии изготовления ПТШ имеют меньший разброс электрических параметров, ток в них течет не через p-n-переход, а между омическими контактами в однородной среде канала, поэтому ПТШ обладают более высокой линейностью ВАХ, нет шумов тока распределения, а плотность тока может быть большей, следовательно, уровень их шумов меньше, а отдаваемые мощности больше. Внутренняя обратная связь через паразитные емкости в ПТШ незначительна, поэтому усилители, с использованием ПТШ работают более устойчиво в широком диапазоне частот. Выходная мощность ПТШ на арсениде галлия превышает мощность биполярных транзисторов уже на частотах 4 … 5 ГГц, а по коэффициенту шума на частотах выше 1 … 1 , 5 ГГц.

ПТШ так же, как биполярные, обеспечивают сравнительно малое усиление. Достигнутые значения $K_{р\ макс}$ в зависимости от частоты лежат в пределах 7 … 1 5 дБ.

Наибольшее применение ПТШ на основе GeAs нашли в малошумящих СВЧ усилителях. В диапазоне 4 … 4 0 ГГц они являются лучшими по шумовым и усилительным характеристикам, чем другие приборы того же назначения. Большой динамический диапазон и хорошие шумовые характеристики позволяют использовать их в смесителях. Дальнейшее совершенствование ПТШ привело к созданию транзисторов с двумя затворами или полевого тетрода. При включении полевого тетрода по схеме с общим истоком входной сигнал подводиться к одному из затворов, а на другой подается управляющее напряжение 2 , 5 … 4 В, с помощью которого можно изменять величину коэффициента усиления транзистора от максимального значения до нуля.Наименьшие значения коэффициента шума $K_ш$ =0,6...0,8 дБ имеют ПТ СВЧ особой конструкции, получившие название HEMT-транзисторы (High Electron Mobility Transistor) - транзисторы с высокой подвижностью электронов. HEMT-транзисторы имеют канал состоящий из слоев GaAs и арсенида галлия, легированного атомами алюминия. Благодаря различию свойств материалов на границе слоев образуется сверхтонкий 1 0 … 1 5 нм

слой с очень высокой плотностью носителей заряда, в котором электроны имеют высокую подвижность, что позволяет увеличить граничную частоту транзистора и снизить шумы. Такие транзисторы широко применяются в приемных установках спутниковых систем телевидения и связи. Необходимо отметить, что полевые транзисторы СВЧ диапазона очень критичны к перенапряжению и действию электрических зарядов (энергия выгорания $1..4x10^{7}$Дж), поэтому необходимо применять меры защиты от перегрузок по входу и цепям питания.

42. Физические основы квантовых приборов

Квантовыми приборами называют совокупность радиотехнических и оптических устройств – генераторов, усилителей и различного рода преобразователей, действие которых основано на явлении вынужденного (индуцированного) излучения энергии микрочастицами. В отличие от электронных приборов, в которых для усиления или генерирования электромагнитных колебаний используется энергия свободных носителей зарядов – электронов, в квантовых приборах используется внутренняя энергия микрочастиц (энергия атомов, ионов, молекул). Энергия атома или молекулы может принимать лишь некоторые определенные (дискретные) значения, называемые энергетическими уровнями. Совокупность возможных энергетических уровней частицы называют энергетическим спектром частицы. Графически уровни энергии можно изобразить по аналогии с потенциальной энергией тела, поднятого на различные высоты (уровни), где каждому значению энергии W, отложенному по вертикали, соответствует горизонтальная прямая (рис. 12.1). Самый нижний уровень, соответствующий наименьшей возможной энергии, называется основным, а все остальные являются возбужденными, так как для перехода на них с основного уровня частица должна возбудиться – поглотить определенную энергию. В дальнейшем совокупность частиц будем называть квантовой системой.

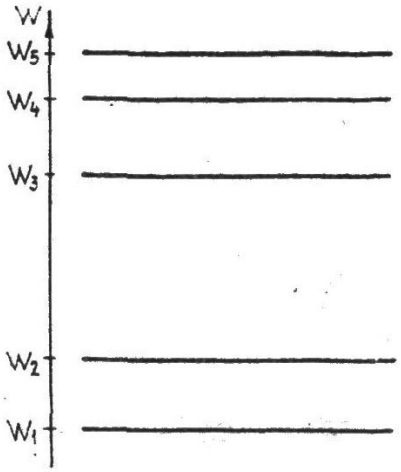


Рис. 12.1

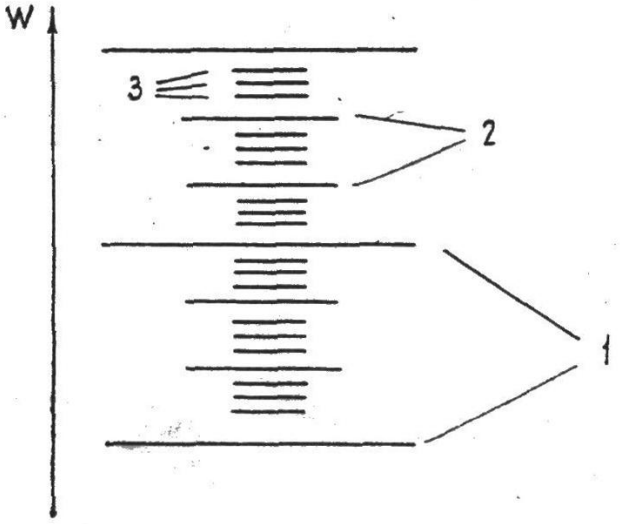


Рис. 12.2

Энергетический спектр молекулы рис. 12.2 гораздо сложнее энергетического спектра атома. В первом приближении полную внутреннюю энергию молекулы, можно представить в виде суммы трех слагаемых

$$W = W_{эл} + W_{кол} + W_{вр}, \qquad (12.1)$$

где $W_{эл}$ – энергия, обусловленная движением электронов; $W_{кол}$ – энергия, обусловленная колебательным движением атомов относительно друг друга; $W_{вр}$ – энергия, которая определяется вращательным движением молекулы как целого.

Если энергия атома, молекулы либо иона изменяется от значения W_n до W_m, то говорят, что частица совершила переход с уровня W_n на уровень W_m. При $W_n > W_m$ наблюдается излучение кванта энергии

$$h\nu_{nm} = W_n - W_m, \qquad (12.2)$$

где ν_{nm} – частота, на которой излучается квант, или частота энергетического перехода.

Из постулата Бора (12.2) следует, что частота перехода определяется только энергетическим зазором $W_n - W_m$, т.е.

$$\nu_{nm} = (W_n - W_m)/\hbar, \qquad (12.3)$$

где $\hbar = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка.

При переходе с низкого уровня W_m на более высокий W_n частица поглощает такой же квант энергии.

Квантовые переходы могут быть излучательными и безизлучательными. При излучательных квантовых переходах происходит излучение либо поглощение кванта электромагнитной энергии, а при безизлучательных переходах квант энергии выделяется в виде тепла, либо приводит к возбуждению других частиц.Излучательные квантовые переходы могут быть спонтанными (самопроизвольными) либо вынужденными (индуцированными, стимулированными).Спонтанные переходы могут совершать возбужденные частицы, переходя с более высокого уровня на низкий. Это объясняется тем, что возбужденное состояние частицы является неустойчивым, и через некоторое время пребывания на верхнем уровне она самопроизвольно (спонтанно) под действием внутренних возмущений совершает переход на нижний энергетический уровень. При спонтанных переходах излучения частиц некогерентны, т.е. ни их начальные фазы, ни направления распространения не коррелированны между собой. Такое излучение представляет собой не что иное, как шум.Если же квантовая система облучается электромагнитной волной на частоте перехода (12.3), то возможны переходы с верхнего уровня W_n на нижний W_m и с нижнего уровня W_m на верхний W_n. В первом случае под действием внешнего электромагнитного поля с частотой ν_{nm} происходит вынужденное испускание квантов энергии $\hbar\nu_{nm}$. При этом излучения отдельных квантов когерентны и синфазны с облучающим электромагнитным колебанием, т.е. происходит усиление облучающего поля. Это служит предпосылкой для создания квантовых усилителей и генераторов, рабочая частота которых определяется энергетическим расстоянием между уровнями.Необходимо отметить, что при вынужденных переходах с излучением энергии не затрачивается энергия внешнего поля, которое является лишь стимулятором процесса.При вынужденных переходах с нижнего уровня W_m на верхний W_n необходимо затратить энергию внешнего поля, равную разности энергии верхнего и нижнего уровней: $\hbar\nu_{nm} = W_n - W_m$.Анализ выражения (12.3) показывает, что переходам между электронными уровнями соответствует излучение на частотах 10^{14}–10^{15} Гц (видимый и ультрафиолетовый диапазоны волн), переходам между колебательными уровнями соответствует инфракрасная область спектра (10^{12}–10^{13} Гц), переходам между вращательными уровнями – излучение в диапазоне миллиметровых длин волн на частотах 10^{10}–10^{11} Гц.

Квантовые переходы являются случайными процессами и поэтому характеризуются вероятностными характеристиками, для определения которых рассмотрим энергетически изолированную квантовую систему. Для простоты рассуждений будем полагать, что каждая частица может обладать лишь двумя уровнями энергии: нижним W_1, либо верхним W_2. Такие системы называют двухуровневыми. Число частиц в 1 см^3 вещества, находящихся на данном энергетическом уровне, называется населенностью этого уровня. Пусть населенности нижнего и верхнего уровней равны соответственно N_1 и N_2. Подсчитаем число спонтанных переходов dN_2 за время dt при вероятности спонтанного перехода A_{21} в единицу времени:

$$dN_2 = -A_{21}N_2 dt. \qquad (12.4)$$

Здесь знак «минус» отражает убывание населенности N_2. После интегрирования (12.4) получим

$$N_2 = N_2(0)e^{-A_{21}t}, \qquad (12.5)$$

где $N_2(0)$ –населенность верхнего уровня W_2 в момент времени t = 0, т. е. исходное значение населенности N_2.

Из последнего выражения видно, что населенность верхнего уровня убывает с течением времени по экспоненте.

Величина, обратная вероятности перехода в единицу времени,

$$\tau = 1/A_{21} \qquad (12.6)$$

называется средним временем жизни частиц на данном уровне, или временем релаксации. Эта величина характеризует время, в течение которого первоначальная населенность верхнего уровня убывает в e=2,73 раза. Типичное время релаксации составляет 10^{-6}–10^{-9} с. Но иногда это время оказывается значительно больше, достигая 10^{-3} с и даже секунд. Такие уровни называются метастабильными. Именно они используются для усиления и генерации.Следует отметить, что в энергетически изолированной квантовой системе спонтанным переходам с верхних уровней на нижние сопутствуют переходы и в обратном направлении, так как излученные кванты поглощаются частицами нижних уровней, и они переходят «наверх». При постоянной температуре наблюдается термодинамическое равновесие, т. е. среднее число переходов «вниз» и «наверх» одно и то же. Распределение населенностей при термодинамическом равновесии называется равновесным. При данной абсолютной температуре T соотношение населенностей уровней определяется законом Больцмана

$$N_1/N_2 = e^{\frac{\hbar\nu_{21}}{kT}}, \qquad (12.7)$$

где k – постоянная Больцмана. При условии $h\nu_{21} >> kT$ получим $N_1 >> N_2$. Таким образом, если частица верхнего уровня может самопроизвольно (спонтанно) излучить энергию и перейти на нижний уровень, то частица нижнего уровня перейдет «наверх» только в том случае, когда поглотит квант энергии. Из рассмотренного следует, что квантовая система, предоставленная сама себе, не может излучать энергию в окружающее пространство. Хоть частицы верхнего уровня и излучают энергию, она поглощается частицами нижнего уровня.

43. Взаимодействие квантовых систем с электромагнитным излучением

Рассмотрим двухуровневую квантовую систему, облучаемую электромагнитной волной, частота которой совпадает с частотой перехода $dN_2 = -A_{21}N_2dt.$

Процессы, происходящие в такой системе, были исследованы А. Эйнштейном в 1917 году. Результаты этих исследований сводятся к следующему.

Частицы верхнего уровня спонтанно излучают энергию, независимо от попавшего в систему электромагнитного излучения $N_2 = N_2(0)e^{-A_{21}t},$

Наряду с излучением энергии за время dt частицы нижнего уровня в количестве dN_1 поглотят энергию. Число dN_1 поглощенных квантов пропорционально плотности энергии ρ в объеме на частоте перехода ν_{21} и числу частиц нижнего уровня, т. е.

$$dN_1 = B_{12}\rho N_1 dt. \qquad (12.8)$$

Коэффициент пропорциональности B_{12} называют коэффициентом Эйнштейна для поглощения. Величина

$$B_{12}\rho = dN_1/N_1dt \qquad (12.9)$$

является вероятностью поглощения.

Число же вынужденных переходов пропорционально плотности энергии на частоте перехода ν_{21} и числу частиц N_2 на верхнем уровне:

$$dN_2 = B_{21}\rho N_2 dt, \qquad (12.10)$$

где B_{21} – коэффициент Эйнштейна для вынужденного излучения. Произведение ρB_{21} представляет собой вероятность вынужденного излучения:

$$B_{21}\rho = dN_2/(N_2dt). \qquad (12.11)$$

Коэффициенты B_{21} и B_{12} имеют смысл вероятностей совершения вынужденных переходов в 1 с при единичной объемной плотности энергии внешнего поля

$\rho = 1$Дж $\cdot$см$^{-3}$ $\cdot$с$^{-1}$.

А. Эйнштейн установил, что вероятности вынужденных переходов в квантовой системе, находящейся в состоянии термодинамического равновесия должны быть равны:

$$B_{12}=B_{21}=B. \qquad (12.12)$$

Вероятность спонтанных переходов пропорциональна третьей степени частоты перехода

$$A_{21} = 8\pi\nu_{21}^3 B_{21}/c^3 . \qquad (12.13)$$

При воздействии на квантовую систему электромагнитного поля наряду с вынужденным излучением происходят вынужденные переходы с поглощением энергии и релаксационные переходы.

Вынужденные переходы с излучением и поглощением энергии имеют резонансный характер, так как происходят при совпадении частоты электромагнитного поля с частотой перехода.

При заданной объемной плотности энергии внешнего поля ρ число вынужденных переходов в единицу времени в единице объема с выделением энергии будет равно

$$\frac{dN_2}{dt} = B_{21}\rho N_2. \qquad (12.14)$$

Выделяемая при этих переходах энергия в единице объема в единицу времени, т.е. мощность

$$P_{выд} = \frac{dN_2}{dt}\hbar\nu_{21} = B_{21}\rho N_2\hbar\nu_{21}. \qquad (12.15)$$

Аналогично поглощаемая от внешнего поля мощность в единице объема будет равна:

$$P_{погл} = \frac{dN_1}{dt}\hbar\nu_{21} = B_{12}\rho N_1 h\nu_{21}. \qquad (12.16)$$

С учетом полученных выражений (12.12),и $N_1/N_2 = e^{\frac{\hbar\nu_{21}}{kT}}$, найдем результирующую мощность P, которой обменивается внешнее поле с квантовой системой:

$$P = P_{выд} - P_{погл} = Bh\nu_{21}\rho(N_2 - N_1). \qquad (12.17)$$

Если P>0, т.е. выделяемая мощность превышает поглощаемую, то в системе происходит усиление внешнего электромагнитного поля. При P<0 преобладает поглощение энергии и энергия внешнего поля убывает.

Из полученного выражения следует, что для получения усиления внешнего поля необходимо и достаточно выполнения условия

$$N_2 > N_1. \qquad (12.18)$$

Такое состояние квантовой системы, при котором населенность верхнего уровня больше населенности нижнего, называется состоянием с инверсной населенностью, а среда с инверсной населенностью называется инверсной или активной.

В случае возможного равенства населенностей верхнего и нижнего уровней ($N_2=N_1$), то из (12.17) следует, что в этом случае P= 0, т. е. отсутствует усиление и ослабление внешнего электромагнитного поля. Такое состояние с равными населенностями уровней называют насыщением перехода.

Таким образом, поскольку только активная среда обеспечивает увеличение мощности облучающего поля, становится очевидной структурная схема квантового усилителя (рис. 12.3).

Принцип его действия сводится к тому, что входным сигналом, подлежащим усилению, облучаются частицы активной среды. Если частота входного сигнала совпадает с частотой квантового перехода, то частицы верхнего уровня стимулированно излучают энергию и увеличивают мощность входного сигнала. Поэтому

$$P_{вых} = P_{вх} + P_a, \qquad (12.19)$$

где P_a – результирующая мощность, излученная активной средой. Из (12.19) ясны усилительные свойства, а именно: мощность выходного сигнала $P_{вых}$ возрастает по сравнению с $P_{вх}$ на величину P_a.

Для построения генератора необходимо выход усилителя соединить со входом элементом обратной связи, как показано на рис. 12.4.

Если в усилителе поле, облучающее активную среду, возбуждается входным сигналом, подлежащим усилению, то в квантовом генераторе такое поле первоначально возникает за счет флуктуации, и в частности за счет спонтанного излучения.

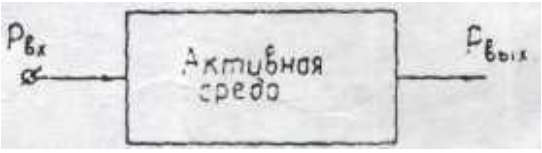


Рис. 12.3

Рис. 12.4

Для создания активной среды в современных квантовых приборах используются два основных метода: сортировка частиц по энергетическим состояниям и инверсия населенностей.

Метод сортировки преследует цель удалить из системы частицы нижнего энергетического уровня и заключается в пространственном разделении атомов либо молекул верхнего и нижнего уровней. Для этого используют неоднородные постоянные электрические или магнитные поля, а сам метод применим только для газообразных веществ.

Инверсия населенностей достигается следующими способами: вспомогательным излучением (накачкой), электронным возбуждением (бомбардировкой электронами), инжекцией носителей заряда и др.

Все перечисленные методы обеспечивают не что иное как питание квантовых приборов.

44. Спектральная линия излучения

Применительно к двухуровневой системе из выражения $\nu_{nm} = (W_n - W_m)/\hbar$ следует, что при строго фиксированных W_2 и W_1 излучается энергия на одной-единственной частоте, т. е. излучение монохроматично. Однако в реальных системах уровни W_2 и W_1 не являются бесконечно тонкими. Они имеют конечную ширину, или «размытость». Поэтому частота ν_{21} не является строго фиксированной и поглощение энергии квантовой системой либо излучение наблюдается в некоторой полосе частот $\Delta\nu$. Эта полоса тем уже, чем больше время жизни частиц на верхнем уровне. Последнее утверждение вытекает из принципов неопределенностей В. Гейзенберга.

Из теории колебаний известно, что если длительности сигнала Δt соответствует полоса частот $\Delta\nu$, то

$$\Delta t \Delta\nu \approx 1. \qquad (12.20)$$

Из (12.3) можно установить, что какому-либо изменению энергии ΔW частицы соответствует изменение частоты перехода

$$\Delta\nu = \Delta W/h. \qquad (12.21)$$

Подставив (12.21) в (12.20), получим

$$\Delta W \Delta t \approx h. \qquad (12.22)$$

Выражение (12.22) является одним из соотношений неопределенностей В. Гейзенберга.

Поскольку постоянная Планка $\hbar$ есть числовой коэффициент, то из (12.22) видно, что некоторой размытости уровня ΔW соответствует неопределенность момента времени Δt перехода частицы с одного уровня на другой. Поскольку спонтанные переходы имеют статистический характер, то неопределенность Δt выражается в произвольности времени жизни τ частицы на верхнем уровне, т. е. $\Delta t = \tau$. Тогда (12.22) перепишется в виде

$$\Delta W \tau \approx h. \qquad (12.23)$$

Монохроматичному излучению соответствует равенство $\Delta\nu = 0$, которое выполнимо лишь при $\Delta W = 0$. Но для этого, как следует из (12.22), требуется $\tau \to \infty$, т. е. время жизни частиц на верхнем уровне должно быть неограниченным. Поскольку это невозможно, размытость уровня ΔW является конечной величиной и, следовательно, излучение не является монохроматичным.

Таким образом, частицы излучают целый спектр частот, образующий спектральную линию (рис. 12.5).

Из рис. 12.5 видно, что максимум мощности $P_{макс}$ излучается (поглощается) на средней частоте перехода ν_0. Однако из-за размытости уровней имеется излучение (поглощение) и на других частотах.

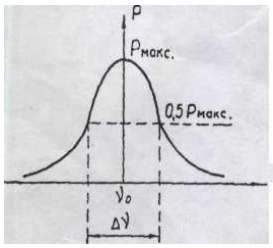


Рис. 12.5

Частотные свойства активной среды оценивают шириной спектральной линии $\Delta\nu$, отсчитываемой на уровне половинной мощности $0{,}5P_{max}$.

Если частицы не подвержены внешним воздействиям, то $\Delta\nu$, определяемая по соотношениям (12.21) и (12.23), обусловлена только временем жизни частиц τ на верхнем уровне. Такое значение $\Delta\nu$ называется естественной шириной спектральной линии, которая фактически обусловлена только спонтанным излучением.

Поскольку интенсивность спонтанного излучения пропорциональна третьей степени частоты перехода $A_{21} = 8\pi\nu_{21}^3 B_{21} / c^3$,то естественная ширина спектральной линии с ростом частоты увеличивается.

Форма спектральной линии, в случае естественной ее ширины, может быть представлена так называемой лоренцевой кривой, совпадающей с резонансной характеристикой колебательного контура.

В реальных условиях наблюдается «уширение» спектральных линий, т. е. они становятся больше естественных. Если при уширении форма спектральной линии остается лоренцевой, а меняется лишь ее ширина, то такое уширение называется однородным. Различают также неоднородное уширение, характеризующееся тем, что при этом изменяется форма спектральной линии.

45. Квантовые генераторы СВЧ

Исторически первым квантовым прибором СВЧ является аммиачный генератор, структурная схема которого приведена на рис. 12.6. Он состоит из трех основных узлов: источника аммиака 1, сортирующего устройства 2 и объемного резонатора 3, настроенного на частоту перехода. Рабочим веществом являются молекулы аммиака NH_3. Использование колебательных уровней молекул аммиака определяет частоту перехода, равную 23870, 14 МГц, на которой работает аммиачный генератор.

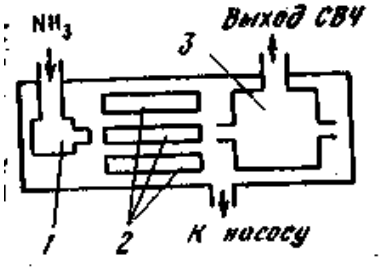


Рис. 12.6

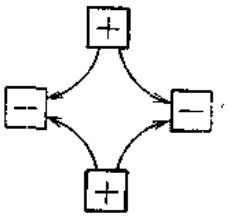


Рис. 12.7

В качестве сортирующего устройства используется квадрупольный конденсатор (рис. 12.7), представляющий собой четыре параллельно расположенных металлических стержня, к которым прикладывается постоянное напряжение порядка 20 кВ. Напряженность электрического поля между стержнями максимальна вблизи стержней и равна нулю на оси симметрии конденсатора, вдоль которой распространяются молекулы аммиака. Под действием неоднородного электрического поля квадрупольного конденсатора происходит пространственное разделение молекул нижнего и верхнего уровней. Молекулы верхнего уровня будут двигаться по оси симметрии и направляться в объемный резонатор, а молекулы нижнего уровня будут отклоняться от оси симметрии и удаляться из устройства с помощью вакуумного насоса.

Молекулы верхнего уровня, влетевшие в резонатор, в первоначальный момент излучают свою энергию либо под действием флуктуаций электрического поля резонатора, либо спонтанно, в результате чего увеличивается плотность энергии р в резонаторе, а также усиливается вероятность pB_{21} индуцированного излучения энергии последующими молекулами. Поскольку через резонатор пролетают молекулы непрерывным потоком, то последующие молекулы излучают энергию под действием электромагнитного поля, обусловленного излучением предыдущих молекул.

Таким образом, осуществляется положительная обратная связь, в результате действия которой, в резонаторе возбуждаются колебания, мощность которых нарастает до установившегося значения. Посредством выходного волновода мощность из резонатора отводится в нагрузку.

Мощность аммиачных генераторов не превышает $10^{-10} \div 10^{-9}$ Вт.

Относительная стабильность частоты генератора

$$S = \Delta\nu_{ген} / \nu_0 , \qquad (12.24)$$

где $\Delta\nu_{ген}$ – абсолютные произвольные изменения частоты генерируемых колебаний, ν_0 – частота перехода для аммиачного генератора, не лучше 10^{-9}.

Помимо аммиачного генератора используется квантовый водородный генератор, работающий на длине волны, равной 21 см. Относительное изменение его частоты не превышает 10^{-11}, т.е. нестабильность на два порядка меньше по сравнению с аммиачным генератором.

В водородных генераторах используется энергетический переход, обусловленный расщеплением основного уровня атома водорода. Энергетический зазор между используемыми уровнями в водородном

генераторе равен $5 \cdot 10^{-6}$ эВ, т.е. на два порядка меньше чем у аммиачного, поэтому выходная мощность также меньше и не превышает

$10^{-12} – 10^{-11}$ Вт.

Водородный генератор состоит из тех же основных элементов, что и аммиачный генератор: источника газа, сортирующего устройства, резонатора.

Атомы водорода обладают магнитным дипольным моментом и для их сортировки используют неоднородное магнитное поле, создаваемое системой постоянных магнитов.

Высокая стабильность частоты квантовых генераторов позволяет использовать их в качестве активных стандартов частоты

46. Квантовые усилители

Если на активную среду, размещенную в отрезке волновода воздействует входной сигнал мощностью $P_{вх}$, частота которого совпадает с частотой перехода активной среды, то за счет индуцированного излучения может произойти усиление входного сигнала до мощности $P_{вых}$ (рис. 12.8)

$$K_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}. \qquad (12.25)$$

При маломощных входных сигналах активная среда обладает линейными свойствами. Тогда прирост мощности ΔP сигнала на участке активной среды пропорционален длине участка dz и абсолютной мощности P:

$$dP = \alpha P dz, \qquad (12.26)$$

где α – коэффициент пропорциональности. Интегрируя (12.25)

$\int_{P_{вх}}^{P_{вых}} \frac{dP}{P} = \alpha \int_0^2 dz$ получим $\ln P_{вых} - \ln P_{вх} = \alpha$; или, с учетом $S = \Delta\nu_{ген}/\nu_0$

$$K_P = e^{\alpha z}. \qquad (12.27)$$

Для определения физического смысла коэффициента α разложим (12.26) в степенной ряд и, полагая $\alpha << 1$, ограничимся двумя первыми членами разложения:

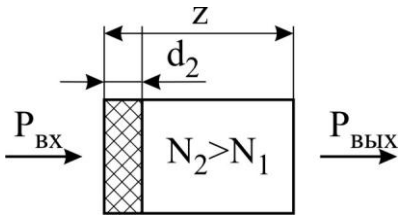


Рис.12.8

$$K_P = 1 + \alpha z.$$

С учетом выражений $S = \Delta\nu_{ген}/\nu_0$,(12.28) и (12.18) найдем.

$$\alpha = \frac{P_{вых} - P_{вх}}{P_{вх} \cdot z} \qquad (12.29)$$

Таким образом величина α представляет собой коэффициент усиления $\frac{P_a}{P_{вх}}$ активной среды, приходящийся на единицу её длины, и называется коэффициентом квантового усиления, α имеет размерность 1/см.

Волна, проходя в активной среде расстояние $z = 1/\alpha$, увеличивает свою мощность в e=2,73 раза. Как следует из (12.26) единственным способом увеличения коэффициента усиления является увеличение длины активной среды. Так как α не превышает 10^{-2}, то для достижения K_P=100 требуется z = 5 м, что практически неосуществимо.

Для уменьшения геометрической длины квантовых усилителей без уменьшения их эффективности используют действие положительной обратной связи. Для этого активное вещество помещают в объемный резонатор, настроенный на частоту перехода, т.е. на частоту усиливаемого сигнала. Волна, пройдя через активное вещество, усиливается в $e^{\alpha z}$ раз, где z – длина, на которой распределено активное вещество. Затем, отразившись от стенок резонатора, снова проходит через вещество и усиливается еще в $e^{\alpha z}$ раз и т.д. В результате многократного отражения волн коэффициент усиления может достигнуть сколь угодно больших значений. Выходная мощность не может возрастать неограниченно, так как каждый индуцированный переход «вниз» уменьшает населенность верхнего уровня и увеличивает населенность нижнего уровня. При равенстве населенностей верхнего и нижнего уровней усиление исчезает, поэтому необходимо поддерживать избыток частиц на верхнем уровне.

Величина коэффициента квантового усиления α должна быть возможно большей. Можно показать, что

$$\alpha \approx (N_2 - N_1), \qquad (12.30)$$

поэтому рабочее вещество должно обладать возможно большей концентрацией частиц, чтобы обеспечивать максимальное усиление сигнала.

Для создания широкополосного квантового усилителя необходимо активное вещество с широкими спектральными линиями в СВЧ диапазоне. Широкие спектральные линии возникают при сильном взаимодействии частиц в плотных средах – жидкостях и твердых телах. Однако в таких средах трудно подобрать систему уравнений, соответствующих СВЧ диапазону и осуществить инверсию населенностей уровней.

Использование в качестве активной среды диамагнитных кристаллов с примесью парамагнитных ионов позволило создать квантовые усилители, работающие в СВЧ диапазоне. Такого рода усилители получили название квантовых парамагнитных усилителей (КПУ).

В КПУ в качестве активного вещества используют рубин (Al_2O_3), рутил (TiO_3) с примесью ионов хрома Cr^{+++} и других веществ.

Ионы хрома являются парамагнитными веществами, у которых под действием внешнего магнитного поля появляются магнитный момент и происходит расщепление энергетических уровней на подуровни (зеемановское расщепление уровней).

В результате расщепления уровней образуется квантовая система с энергетическими зазорами между уровнями соответствующими переходам, лежащими в области СВЧ.

Характер расщепления уровней и значения зазоров между подуровнями зависит от ориентации кристалла парамагнетика относительно внешнего постоянного магнитного поля и от напряженности магнитного поля. Усиление электромагнитных колебаний в КПУ происходит за счет вынужденного излучения, обусловленного электронным парамагнитным резонансом.

Электронный парамагнитный резонанс – это избирательное по частоте поглощение либо излучение электромагнитной энергии парамагнитным веществом, находящимся в постоянном магнитном поле.

При облучении парамагнитных ионов на частоте перехода в процессе ЭПР наблюдается поглощение энергии электромагнитного поля ионами нижнего уровня. Следовательно в результате ЭПР может достигаться населенностей, т.е. может создаваться активная среда. Она же, в свою очередь способна усилить сигнал. Для обеспечения усиления необходимо осуществить многократное взаимодействие усиливаемого сигнала с активной средой, для чего парамагнитное вещество размещают в объемном резонаторе. Он должен иметь две резонансные частоты: одна резонансная частота должна совпадать с частотой усиливаемого сигнала, а вторая – с частотой накачки.

Существенное влияние на эффективность работы КПУ и его параметры оказывает охлаждение до температуры жидкого гелия (4,2 К) активного вещества и резонатора.Для этого они помещаются в криостат, образованный двумя сосудами Дьюара, из которых внутренний заполнен жидким гелием, а внешний – жидким азотом. Криостат размещается между полюсными наконечниками электромагнита, создающего магнитное поле для парамагнитного резонанса в активном веществе.

Сильное охлаждение приводит к замедлению тепловых процессов в парамагнетике, металле резонатора, благодаря чему увеличивается коэффициент усиления КПУ, снижается мощность накачки, увеличивается КПД усилителя и уменьшаются его шумы.

КПУ являются самыми малошумящими приборами в диапазоне СВЧ.

Из-за сложности конструкции КПУ нашли применение только в стационарных устройствах в радиоастрономии, дальней космической связи, для усиления предельно слабых сигналов и только при отсутствии сильных помех

47. Общий принцип действия лазера

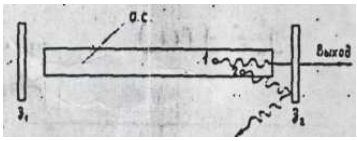
Из-за большой интенсивности спонтанного излучения в оптическом диапазоне усилители не нашли применения. Поэтому квантовые приборы оптического диапазона в основном представлены оптическими квантовыми генераторами (ОКГ). Эти приборы известны также под названием «лазеры».

Лазер не имеет прототипов и является единственным источником когерентного излучения. Когерентность, монохроматичность и направленность излучения отличают лазер от всех прочих естественных и искусственных источников света. Лазер состоит из трех основных элементов: рабочего вещества, источника питания и резонансной системы.

По агрегатному состоянию рабочего вещества лазеры подразделяются на твердотельные, жидкостные и газовые.

Что касается источника питания, то он предназначен для создания активной среды, т. е. для обеспечения инверсии населенностей. В этой связи для питания используются вспомогательное излучение (подсветка), электронная бомбардировка, инжекция носителей заряда и другие методы.

В качестве резонансной системы в любом лазере используется открытый резонатор Фабри-Перо, в задачу которого входит обеспечение положительной обратной связи.



а.с.–активная среда;

$з_1$ и $з_2$–зеркала резонатора Фабри–Перо

Схема лазера приведена на рис. 12.9

Активная среда, созданная в рабочем веществе посредством источника питания (на схеме не показан) располагается в открытом резонаторе Фабри-Перо. Он представляет собой два плоско-параллельных зеркала $з_1$ и $з_2$, отражающие поверхности которых обращены друг к другу. Для вывода энергии хотя бы одно из зеркал, например $з_2$, выполняется полупрозрачным. Расстояние между зеркалами равно целому числу длин полуволн.

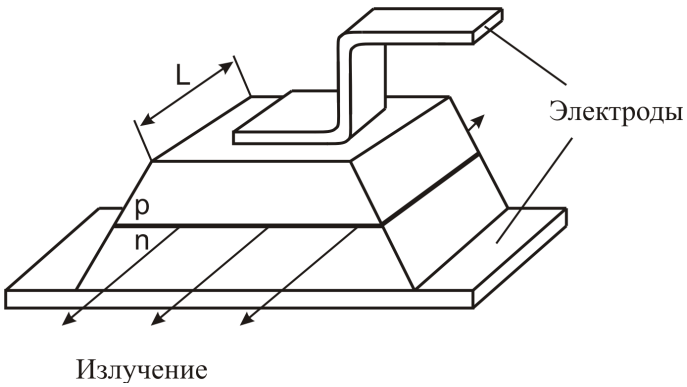
В активной среде всегда имеются спонтанно излученные фотоны (кванты). Их характеристики и, в частности, направления распространения произвольны и равновероятны. Поэтому в ансамбле спонтанно излученных фотонов может оказаться фотон типа 1 с направлением распространения, перпендикулярным поверхности зеркал. Встречая на своем пути частицы верхнего энергетического уровня, фотон 1 облучает их, вызывая стимулированное излучение новых фотонов.

В соответствии с законом индуцированного излучения, вновь излученные фотоны имеют такие же характеристики (фазу, поляризацию и направление распространения), как и первичный облучающий фотон. Излученные фотоны, следовательно, распространяются также в направлении, перпендикулярном поверхности зеркал. На своем пути они облучают частицы верхнего уровня и т. д.

Таким образом, из-за спонтанно излученного фотона 1 появляется лавина стимулировано излученных фотонов с одинаковыми характеристиками, т. е. возникает когерентное излучение. Достигнув полупрозрачного зеркала $з_2$, часть фотонов выходит наружу, обеспечивая выходной луч, а другая их часть, отражаясь под углом падения, возвращается в активную среду и вызывает новую лавину подобных фотонов. Отразившись от зеркала $з_1$, фотоны снова возвращаются в активную среду и вызывают лавину фотонов, подобных себе. Так резонатор Фабри-Перо обеспечивает положительную обратную связь для фотонов с направлением, перпендикулярным поверхности зеркал.

Если же в активной среде возник фотон типа 2 с другим направлением распространения, то, отражаясь зеркалом под углом падения, он не возвращается в активную среду. Следовательно, для фотонов с направлением, не перпендикулярным поверхности зеркал, положительной обратной связи нет. Таким образом, лазер излучает поток когерентных фотонов с направлением, перпендикулярным поверхности зеркал резонатора, т. е. направленность излучения довольно высока. Луч лазера обладает как временной, так и пространственной когерентностью.

48. Полупроводниковые лазеры



В полупроводниковых лазерах активной средой является кристалл полупроводника. Широкое распространение получил инжекционный лазер на основе арсенида галлия (GaAs), конструкция которого показана на рис. 12.28. Монокристалл арсенида галлия имеет форму призмы, на основаниях которой изготовлены контакты, один из контактов выполняется массивным для отвода тепла от области p-n-перехода. Полупроводниковые лазеры, изготовленные из одного вида полупроводника называются гомолазерами. В инжекционном лазере используется p-n-переход между вырожденными полупроводниками n- и p-типа. Состояние с инверсией населенностей получается при прямом включении p-n-перехода. В этом случае происходит встречная инжекция электронов из n-области и дырок из p-области. В результате этого в области перехода значительно возрастает число свободных электронов и дырок и уменьшается число валентных электронов (растет число дырок). При достаточной величине прямого напряжения в некотором узком слое перехода возникает состояние с инверсией населенностей и появляется возможность усиления. Этот слой становится активной средой. Положительная обратная связь, необходимая для самовозбуждения лазера, обеспечивается следующим образом. Из-за различия показателей преломления материала и воздуха излучение, распространяющееся в активной среде, частично отражается от границы раздела. Чтобы усилить обратную связь, две грани призмы кристалла (передняя и задняя на рис 12.28) делаются параллельными друг другу и перпендикулярными плоскости p-n-перехода. Отражающие поверхности (грани) образуют оптический резонатор. Так как расстояние между гранями превышает длину волны оптического излучения, самовозбуждение лазера возможно только на некоторых собственных частотах резонатора. Две другие грани наклонены к плоскости p-n-перехода, чтобы не создавать в этом направлении условий для самовозбуждения. Размеры сторон полупроводника порядка нескольких десятых долей миллиметра. Спонтанное излучение, всегда имеющееся в веществе, вызывает вынужденные переходы. Лавинообразно нарастает число фотонов, направление распространения и частота которых удовлетворяет условиям самовозбуждения. При некотором пороговом токе, когда вынужденное излучение , вызванное спонтанным излучением, достаточно для компенсации потерь света в материале полупроводника и в отражающих поверхностях наступит генерация. Таким образом, p–n переход при малых токах является источником спонтанного (рекомбинационного) излучения, а при токах более порогового – источником когерентного излучения. Для когерентного излучения необходимая плотность тока достигает значений 10 кА/см^2, что делает невозможным непрерывный режим работы при комнатной температуре. Современные гомолазеры обеспечивают мощность излучения порядка 100 Вт в режиме непрерывного генерирования при температуре жидкого гелия 4,2 К и порядка 10 Вт в режиме импульсного генерирования при комнатной температуре. КПД в лучших экземплярах составляет 60…70%. Практическая реализация непрерывного режима работы полупроводникового лазера при комнатной температуре стала возможной в результате использования гетеропереходов, основанных на контакте полупроводников с различной шириной запрещенной зоны. Отличие структуры гетеролазеров от простейшей структуры лазера, показанной на рис.9.1, состоит в том, что по обе стороны от активного слоя создаются слои из полупроводника с большей шириной запрещенной зоны (так называемые лазеры с двойной гетероструктурой). Образовавшиеся гетеропереходы препятствуют проникновению инжектированных в активный слой носителей из одного широкозонного слоя в другой. Поэтому наблюдается эффект удержания носителей в узком активном слое и снижается необходимый пороговый ток. Кроме этого, наблюдается эффект удержания света в активном слое. Связано это с тем, что коэффициент преломления материала с большей шириной запрещенной зоны оказывается меньше, чем в активном слое, имеющем меньшую ширину запрещенной зоны. Происходящая концентрация света и носителей в активном слое обеспечивает их эффективное взаимодействие и делает возможным создание лазеров с низким пороговым током, которые могут работать при комнатных температурах. В качестве материала для активного слоя может быть, например, использован GaAs (p-типа), а в соседних слоях – сложные соединения $Al_xGa_{1-x}As$ (n- и p^+-типа). Индекс x определяет соотношение компонентов (Al и As), которое влияет на значение ширины запрещенной зоны. Изменяя концентрацию примесного алюминия от 0 до 30% можно создавать лазеры с различной длиной волны излучения в пределах 0,9 … 0,68 мкм. Достоинствами гетеролазеров являются высокий КПД, малые габариты, удобство модуляции. Из-за малых размеров излучающей поверхности направленность излучения полупроводниковых лазеров значительно хуже чем других типов лазеров. Недостатком полупроводниковых лазеров также является зависимость спектра излучения от температуры.