

С. В. Кукарин

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВЧ ПРИБОРЫ

ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРИМЕНЕНИЕ,
ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Издание второе,
переработанное и дополненное

МОСКВА

«РАДИО И СВЯЗЬ» 1981

ББК 32.85
К 90
УДК 621.385.6

Кукарин С. В.

К 90 Электронные СВЧ приборы: Характеристики, применение, тенденции развития. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1981. — 272 с., ил.
В пер.: 1 р. 20 к.

Приводятся технические эксплуатационные характеристики и области применения современных электронных приборов, включая триоды и тетроды, приборы магнетронного типа, клистроны, лампы бегущей и обратной волны, приборы гибридного типа, полупроводниковые диоды и транзисторы, а также генераторы и усилители на их основе.

Рассчитана на специалистов, интересующихся СВЧ приборами и областями их применения. Полезна преподавателям и студентам вузов.

К $\frac{30407-119}{046(01)-81}$ 30-81 2403000000

ББК 32.85
6Ф0.3

Рецензенты: доктор техн. наук проф. В. Н. Сретенский;
доктор техн. наук В. П. Сазонов.

Редакция литературы по электронной технике

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является вторым изданием книги, выпущенной изд-вом «Сов. радио» в 1962 году под названием «Современное состояние и тенденции развития приборов СВЧ». Содержание книги полностью переработано и расширено, поскольку за прошедшие годы в этой динамично развивающейся области электронной техники произошли существенные изменения. Они связаны как с дальнейшим развитием электровакуумных СВЧ приборов, так и с появлением и бурным развитием нового класса электронных приборов и устройств СВЧ на основе применения полупроводниковых диодов и транзисторов.

Отечественная электроника СВЧ достигла больших успехов, как это показано в обзорах Н. Д. Девяткова [1] по электровакуумным и А. С. Тагера [3] по твердотельным приборам СВЧ. Многие достижения советских ученых и инженеров опережают по времени и превосходят по техническому уровню лучшие результаты, полученные зарубежными фирмами. Это имеет место в широкой области электроники СВЧ от сверхминиатюрных электровакуумных и твердотельных приборов до сверхмощных и мощных приборов СВЧ [1—25]. Советскому читателю хорошо известны технические характеристики отечественных СВЧ приборов по справочникам и брошюрам серии «Элементы радиоэлектронной аппаратуры», выпущенным изд-вом «Сов. радио» [26—38]. Вопросы применения этих приборов подробно рассмотрены в работах [19, 20].

Широкую гамму СВЧ приборов выпускают также многие фирмы Америки, Европы и Азии не только для удовлетворения потребностей своих стран, но и для продажи на мировом рынке.

Состояние и тенденции развития этой области электронной техники рассмотрены в книге в основном на примерах зарубежных приборов СВЧ, сведения о которых представляют интерес для широкого круга читателей. При работе над рукописью были использованы периодически выпускаемые ЦНИИ «Электроника» обзоры состояния и тенденций развития зарубежных СВЧ при-

боров [39—65], а также многочисленные материалы, справочники и рекламные сообщения, опубликованные в зарубежной литературе [67—264].

Большую помощь в подборе необходимых материалов и иллюстраций, а также в обсуждении отдельных разделов рукописи оказали В. М. Ломакин, И. П. Блюдов, П. Р. Калиш, В. И. Минц, В. Д. Мельников, В. Г. Зайцева и Л. А. Соколова, которым автор выражает свою благодарность. Автор также с благодарностью принял и учел замечания рецензентов В. Н. Сretenского и В. П. Сазонова.

При работе над столь обширным материалом было трудно избежать отдельных недостатков и неточностей, поэтому с признательностью будут приняты все замечания и предложения читателей, которые следует направлять в адрес издательства.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- U_a — анодное напряжение
 $U_{a \max}$ — максимальное анодное напряжение
 U_d — напряжение диода
 $U_{зд}$ — напряжение замедляющей системы
 U_k — напряжение коллектора
 U_l — напряжение луча
 U_n — напряжение накала
 U_p — напряжение резонатора
 v — скорость перестройки частоты
 v_{\max} — максимальная скорость перестройки частоты
ВАХ — вольт-амперная характеристика
 D — динамический диапазон
 η , КПД — коэффициент полезного действия
 I_a — ток анода
 I_v — ток впадины
 I_d — ток диода
 I_k — ток катода
 I_n — ток накала
 I_n — ток пика
 I_l — ток луча
 K_z — коэффициент заполнения
КСВ — коэффициент стоячей волны
 K_y — коэффициент усиления
 $K_{ш}$ — коэффициент шума
 L — потери преобразования
 $P_{вых}$ — выходная мощность
 $P_{вых \min}$ — минимальная выходная мощность
 $P_{вых \max}$ — максимальная выходная мощность
 P_n — импульсная мощность
 $P_{и \max}$ — максимальная импульсная мощность
 $P_{пр}$ — просачивающаяся мощность
 $P_{ср}$ — средняя мощность
 Π — потери мощности
 Π_r — подавление гармоник
 $R_{вых}$ — выходное сопротивление
 R_n — сопротивление потерь
 C_d — емкость диода
 T — температура

t_y — температура усилителя
ТКЧ — температурный коэффициент частоты
 t_v — время восстановления
 τ — длительность импульса
 f — частота, диапазон частот
 f_{\max} — максимальная частота
 $f_{\text{пред}}$ — предельная резистивная частота
 Δf — диапазон перестройки частоты, полоса пропускания
 Δf_a — диапазон электронной перестройки
 F_{\min} — минимальная чувствительность
 Q — добротность
 W — энергия пика просачивающихся импульсов
ЭСЧ — электронное смещение частоты

ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиолокации, радиорелейной и космической связи, телевидения, радионавигации, промышленной и бытовой электроники, радиоастрономии, радиоспектроскопии, ядерной физики, медицины и многих других отраслей науки и техники неразрывно связано с широким использованием сверхвысоких частот (0,3 ... 3000 ГГц). В зависимости от длины волны электромагнитных колебаний СВЧ разбиваются на диапазоны: дециметровых (0,3 ... 3 ГГц), сантиметровых (3 ... 30 ГГц), миллиметровых (30 ... 300 ГГц) и субмиллиметровых (300 ... 3000 ГГц) волн [19].

Диапазоны дециметровых и сантиметровых волн наиболее освоены и получили широкое практическое применение. Однако в последнее время стал проявляться повышенный интерес к использованию миллиметровых волн в радиолокационных системах с высокой разрешающей способностью, радиорелейных линиях связи, системах скрытой связи с космическими аппаратами, радиоастрономии и радиоспектроскопии. Использование диапазона СВЧ в указанных областях применения стало возможным благодаря созданию и производству всех необходимых электронных приборов, обеспечивающих в этом диапазоне генерирование колебаний, усиление и преобразование сигналов, коммутацию приемно-передающих трактов [5].

В связи с большим разнообразием выполняемых функций, различием требований к техническим характеристикам приборов и ограниченным рабочим диапазоном частот каждого прибора для перекрытия всего диапазона СВЧ потребовалась широкая номенклатура электронных СВЧ приборов. Вместе с тем вследствие конкуренции между изготовителями и отдельными направлениями электроники СВЧ создано много приборов одного и того же функционального назначения с близкими значениями параметров и технических характеристик.

В целях систематизации рассмотрения состояния и анализа тенденций развития СВЧ приборов все их многообразие целесообразно свести к четырем группам при-

боров, отличающимся между собой по используемым физическим принципам.

I группа — электровакуумные СВЧ приборы, основанные на использовании явлений прохождения тока в вакууме;

II группа — твердотельные приборы и СВЧ устройства, созданные на основе использования свойств полупроводниковых приборов и ферритов;

III группа — плазменные (газоразрядные) СВЧ приборы, основанные на использовании явлений прохождения тока в газах;

IV группа — гибридные СВЧ приборы, сочетающие использование в одном приборе нескольких физических принципов.

Указанная система классификации отражает наиболее значительные различия приборов, подчеркивает специфические особенности конструкции и технологии их изготовления и не противоречит сложившимся традициям деления приборов на классы, виды и типы.

I. Электровакуумные СВЧ приборы представляют собой наиболее многочисленную группу, включающую приборы с электростатическим (сеточным) и электродинамическим управлением.

1. К приборам с электростатическим управлением относятся металлокерамические триоды и тетроды, приборы с тормозящим полем. Эти приборы нашли широкое применение в диапазоне СВЧ благодаря созданию специальных конструкций, снижающих вредное влияние времени пролета электронов на работу приборов [1, 26]. Несмотря на длительную историю существования и развития этих приборов процесс их совершенствования непрерывно продолжается в направлениях повышения эффективности и надежности работы, увеличения выходной мощности, освоения коротковолновой части сантиметрового диапазона волн, а также в области создания герметизированных многофункциональных модулей.

2. К приборам с электродинамическим управлением относятся приборы магнетронного типа, лампы бегущей (ЛБВ) и обратной (ЛОВ) волны, клистроны, мазеры на циклотронном резонансе (МЦР или гиротроны).

2.1. Приборы магнетронного типа включают в себя автогенераторы и усилители, работающие в скрещенных электрических и магнитных полях.

К автогенераторам относятся магнетроны обычной конструкции, коаксиальные магнетроны, обращенно-коаксиальные магнетроны, магнетроны с электронной настройкой частоты, лампы обратной волны магнетронного типа и стабилотроны (платинотроны в режиме автогенерации). Указанные виды приборов, в свою очередь, подразделяются по режиму работы на импульсные и непрерывного действия, а по уровню мощности — на сверхмощные и мощные, средней мощности и маломощные. Среди них наиболее распространенными являются магнетроны обычной конструкции, работающие в импульсном и непрерывном режимах. Вместе с тем в последние десять лет большое внимание уделяется развитию коаксиальных магнетронов, которые все более широко применяются взамен магнетронов обычной конструкции.

К усилителям магнетронного типа относятся амплитроны (платинотроны в режиме усиления), приборы с инжектированным электронным потоком с прямой (ЛБВ магнетронного типа, биматроны) и обратной (ЛОВ магнетронного типа) волной, а также приборы с незамкнутым электронным потоком и прямой волной (дематроны). Магнетронные усилители, так же как автогенераторы, подразделяются по режиму работы на импульсные и непрерывного действия, а по уровню мощности — на сверхмощные и мощные, средней и малой мощности.

2.2. Лампы бегущей волны О-типа (с продольным электрическим и магнитным полями) составляют также большой класс электровакуумных СВЧ приборов с электродинамическим управлением. В состав этого класса приборов входят усилительные ЛБВ с различными уровнями выходной мощности и маломощные усилительные ЛБВ. Усилительные ЛБВ по уровню выходной мощности подразделяются на сверхмощные и мощные, средней мощности и маломощные. Сверхмощные и мощные ЛБВ, кроме того, делятся на ЛБВ импульсного и непрерывного режимов.

В последнее время большое внимание уделяется созданию широкополосных и двухрежимных ЛБВ, миниатюрных ЛБВ, в том числе с печатными замедляющими системами для фазированных антенных решеток, ЛБВ средней мощности для космических аппаратов.

2.3. Лампы обратной волны О-типа составляют срав-

нительно небольшой класс СВЧ приборов. Эти приборы используются как СВЧ генераторы с электронной перестройкой частоты в диапазонах от дециметровых до субмиллиметровых волн исключительно в непрерывных режимах работы. По мощности они подразделяются на ЛОВ повышенной мощности и маломощные.

2.4. Клистроны составляют большой класс СВЧ приборов и по принципу работы подразделяются на пролетные и отражательные. Пролетные клистроны включают в себя усилительные многорезонаторные и генераторные клистроны с небольшим числом резонаторов. Эти приборы создаются для работы в импульсном и непрерывном режимах. Многорезонаторные усилительные клистроны по уровню выходной мощности делятся на сверхмощные и мощные. Генераторные включают в себя двух- и трехрезонаторные клистроны и клистроны с распределенным взаимодействием. Эти клистроны относятся к приборам малой и средней мощности. Отражательные клистроны создаются для использования в качестве маломощных СВЧ генераторов непрерывного режима работы.

2.5. Мазеры на циклотронном резонансе представляют собой новый развивающийся класс СВЧ приборов, принцип работы которых основан на релятивистских потоках электронов. В этих приборах получение электронных сгустков обеспечивается группировкой электронов, которая осуществляется за счет использования релятивистского эффекта зависимости циклотронной частоты от энергии электронов. На этом принципе создаются генераторы и усилители, работающие в скрещенных электрическом и магнитном полях, с вращением электронов в продольном магнитном поле. По режиму работы они подразделяются на импульсные и непрерывного действия.

2.6. Гибридные СВЧ приборы составляют также пока небольшой, но успешно развивающийся класс электровакуумных СВЧ приборов. Они основаны на использовании в единой конструкции элементов приборов различных классов. Типичным примером гибридных приборов такого типа являются твистроны, удачно сочетающие в одном приборе элементы многорезонаторного клистрона и широкополосной ЛВВ.

II. Твердотельные приборы и СВЧ устройства представляют собой новую большую группу СВЧ приборов,

развитию которых в последнее время уделяется очень большое внимание. Повышенный интерес к этим приборам и устройствам вызван главным образом их большими потенциальными возможностями для успешного решения проблемы комплексной миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры.

В состав этой группы входят активные и пассивные приборы и СВЧ устройства, а также гибридные интегральные СВЧ схемы.

1. К твердотельным активным приборам и СВЧ устройствам относятся генераторы и усилители на полупроводниковых СВЧ диодах и транзисторах. Эти приборы по своему назначению выполняют такие же функции, как и электровакуумные СВЧ приборы малой мощности, и создаются для замены последних.

1.1. Твердотельные СВЧ генераторы выполняются на основе туннельных и лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна, полевых и биполярных транзисторов. Эти генераторы обеспечивают получение СВЧ колебаний как в непрерывном, так и в импульсном режимах. По уровню мощности они делятся на маломощные и мощные. Дальнейшим развитием твердотельных СВЧ генераторов является создание на их основе комплексированных устройств, включающих генератор, схему управления частотой, источник питания и др.

1.2. Твердотельные СВЧ усилители создаются на основе туннельных, варакторных и лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна, биполярных и полевых транзисторов. Они подразделяются на малошумящие и усилители мощности. Твердотельные СВЧ усилители, так же как генераторы, выпускаются во многих случаях вместе с источниками питания.

2. Пассивные СВЧ устройства состоят из различных элементов СВЧ диапазона, обеспечивающих детектирование, преобразование и умножение частоты, изменение фазы СВЧ колебаний, развязку и переключение каналов, ограничение подводимой СВЧ мощности. К этим устройствам относятся детекторы и смесители, умножители частоты и фазовращатели, переключатели и ограничители мощности, вентили и циркуляторы. Они создаются на основе применения полупроводниковых СВЧ диодов (детекторных, смесительных, туннельных, умножительных и переключательных) и ферритов. Пассивные СВЧ устройства используются и выпускаются в качестве от-

дельных дискретных приборов или в качестве составных элементов комплексированных СВЧ устройств.

3. Гибридные интегральные СВЧ схемы представляют собой новый и быстро развивающийся класс СВЧ приборов, основанных на применении микроминиатюрных активных и пассивных твердотельных СВЧ приборов и технологии микроэлектроники.

К числу этих приборов наряду с однофункциональными схемами генераторов, усилителей и других приборов относятся многофункциональные схемы передающих, приемных и приемно-передающих блоков радиоэлектронной аппаратуры в интегральном исполнении, в том числе фазированных антенных решеток (ФАР).

III. Плазменные (газоразрядные) СВЧ приборы включают в себя активные и пассивные приборы.

1. К пассивным газоразрядным приборам СВЧ относятся резонансные разрядники, основанные на использовании разряда в газе под влиянием мощных импульсов СВЧ колебаний для перекрытия СВЧ тракта на время действия импульсов. По своему функциональному назначению они подразделяются на разрядники предварительной защиты, защиты приемника и блокировки передатчика [12].

2. Активные плазменные СВЧ приборы еще недостаточно разработаны и изучены. Вместе с тем в последнее время появились отдельные экспериментальные образцы плазменных СВЧ генераторов, отличающихся от вакуумных приборов тем, что электронный пучок в этих устройствах проходит через плазму, плотность электронов в которой больше плотности пучка. Поскольку предельные токи пучков, распространяющихся в плазме, значительно превышают предельные токи в вакуумных приборах, появляется возможность достигнуть более высокой выходной мощности.

IV. Гибридные СВЧ приборы представляют собой новую развивающуюся группу СВЧ приборов. К ней относятся приборы различного назначения, в том числе вакуумно-полупроводниковые усилители, гибридные защитные устройства, индикаторные приборы и др. [58, 59]. Вакуумно-полупроводниковые СВЧ усилители основаны на воздействии электронного пучка на полупроводниковую мишень, а гибридные защитные устройства представляют собой совокупность резонансного разрядника с полупроводниковым ограничителем мощности.

Этими примерами не исчерпываются все возможности создания гибридных приборов, которые могут появиться в ближайшем будущем.

Приведенные выше группы и классы СВЧ приборов характеризуются различным уровнем своего развития. Наиболее освоенными в промышленном производстве являются электровакуумные и твердотельные СВЧ приборы. Об уровне промышленного производства этих приборов в настоящее время свидетельствуют данные, приведенные в таблице. В этой таблице указаны сведения не по всем группам и классам приборов. Здесь, например, отсутствуют сведения об объеме продажи СВЧ триодов и тетродов, который трудно выделить из общего объема продажи приборов с электростатическим управлением. Не приведены также сведения о газоразрядных и гибридных СВЧ приборах. Как видно из таблицы, мировой рынок СВЧ приборов продолжает расти. При

Мировой рынок СВЧ приборов в млн. долл.¹⁾

Наименование приборов	1976 г.	Прогноз на 1980 г.
<i>I. Электровакуумные приборы</i>		
Всего	297,5	378,2
в том числе:		
Приборы магнетронного типа		
магнетроны импульсные	31	38
магнетроны непрерывного режима	20,5	29
ЛОВ М-типа	7	8,5
усилители М-типа	8,5	10,5
Лампы бегущей волны	115	142
ЛОВ О-типа	5	3,1
Клистроны:		
мощные пролетные	37	44,5
отражательные	12,5	10
<i>II. Твердотельные приборы</i>		
Всего	129,9	196,6
в том числе:		
Генераторы	31	50,4
Усилители	45,3	71,4
Смесители	8,5	10
Детекторы	4,2	6
Переключатели	10,8	12,5
Интегральные схемы СВЧ	7,8	12,6

¹⁾ По данным, опубликованным в журнале Microwave Systems News, 1977, в.7, № 1, р.51.

этом электровакуумные приборы удерживают ведущее место в общем объеме продажи СВЧ приборов (70% в 1976 г. и 65% в 1980 г.). Продолжается рост объема выпуска и продажи мощных электровакуумных СВЧ приборов, не имеющих конкуренции со стороны твердотельных приборов.

Вместе с тем наблюдается сокращение объема продажи ЛОВ О-типа и отражательных клистронов, которые постепенно вытесняются твердотельными СВЧ генераторами. Маломощные и малошумящие ЛБВ также успешно заменяются твердотельными усилителями на полупроводниковых диодах и транзисторах. Из таблицы также видно, что объем продажи твердотельных СВЧ приборов в 1980 г. по сравнению с 1976 г. вырос в 1,5 раза, в то время как объем продажи электровакуумных приборов всего в 1,27 раза.

Состояние и тенденции развития всех основных групп и классов СВЧ приборов рассматриваются в настоящей книге на основе анализа и обобщения многочисленной периодической отечественной и зарубежной технической литературы. В качестве иллюстраций приводятся обобщенные данные по уровню достигнутых характеристик приборов, таблицы основных параметров лучших или типичных промышленных образцов и рисунки, характеризующие конструкцию и внешний вид рассматриваемых СВЧ приборов.

Приведенные данные хотя и не являются исчерпывающими, тем не менее, по мнению автора, позволяют составить достаточно полное представление о современном уровне развития электронных СВЧ приборов. В книге из-за ограниченности ее объема, опущены некоторые классы приборов, в том числе приборы с тормозящим полем, генераторы и усилители на МСР, мазеры, плазменные приборы, резонансные разрядники, полупроводниковые и ферритовые пассивные устройства, акусто-электронные приборы, анализ состояния и тенденций развития которых может быть предметом специальной работы.

Часть I

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Глава I

ПРИБОРЫ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Приборы с электростатическим управлением благодаря своим конструктивным особенностям имеют ограниченные возможности по увеличению рабочей частоты. Эти ограничения, как известно, связаны с влиянием времени пролета электронов, наличием паразитных межэлектродных емкостей и индуктивностей вводов, а также с потерями в диэлектрических изоляторах. Поэтому они созданы преимущественно в метровом и дециметровом диапазонах волн [26].

Между тем еще в самом начале развития этих приборов были найдены эффективные конструктивные и технологические решения, которые позволили расширить их верхний частотный предел до 1 ... 3 ГГц [1]. В последующие годы в результате дальнейшего совершенствования конструкции, материалов и технологии изготовления приборов с сеточным управлением эта граница была смещена до частоты 16 ГГц [91]. Расширение частотного предела триодов и тетродов было достигнуто в результате сближения электродов, создания мелкоструктурных сеток, развития площади металлических поверхностей вводов электродов с целью уменьшения индуктивного сопротивления, некоторого повышения рабочего напряжения, применения керамики с малыми потерями и др.

Наиболее оптимальными для сантиметрового диапазона волн оказались плоские и коаксиальные металло-керамические триоды и тетроды. Выводы электродов этих приборов обычно представляют собой диски или отрезки цилиндров с очень малым индуктивным сопро-

тивлением. Они удачно сочленяются с внешними колебательными системами коаксиального типа.

Указанные приборы обладают рядом достоинств и выгодно отличаются от приборов с динамическим управлением простотой и жесткостью конструкции, объемно-весовыми характеристиками и стоимостью.

По оценке специалистов фирмы General Electric, плоские металлокерамические триоды имеют самое высокое отношение отдаваемой мощности, КПД, ширины полосы усиления к размерам и массе приборов, а также обеспечивают исключительную устойчивость к тепловым, ударным и вибрационным нагрузкам [93]. Плоские и коаксиальные металлокерамические триоды и тетроды широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре и несмотря на развитие конкурирующих приборов с динамическим управлением и на основе твердого тела продолжают сохранять свои позиции. Они используются в передающих устройствах космических аппаратов, авиационных дальномеров и высотомеров, систем управления воздушным движением, в телевизионных ретрансляторах и др. Наиболее мощные триоды и тетроды продолжают применяться в радиолокационных станциях и в ускорителях элементарных частиц.

В последнее время приборы с сеточным управлением благодаря их хорошей фазовой стабильности, «чистоте» спектра, линейности амплитудно-частотных характеристик, большой долговечности и малой стоимости начали успешно применяться в радиолокационных станциях с фазированными антенными решетками (ФАР). Общее количество рекламируемых приборов с сеточным управлением в СВЧ диапазоне превышает 200 типов. Однако среди них много аналогов, выпускаемых различными зарубежными фирмами. Более развитую номенклатуру имеют металлокерамические триоды.

1.1. ТРИОДЫ

Самыми распространенными СВЧ приборами с сеточным управлением являются плоские и коаксиальные металлокерамические триоды, современный технический уровень которых характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Предельная рабочая частота металлокерамических триодов продолжает смещаться в коротковолновую часть сантиметрового диапазона волн.

В настоящее время отдельными фирмами выпускаются усилительные триоды на частоты до 6 ГГц и генераторные триоды, работающие на частотах до 16 ГГц. Например, фирмой General Electric разработан генераторный триод Y-1399, который в диапазоне частот 16 ... 16,5 ГГц обеспечивает получение выходной мощности до 10 мВт. Этой же фирмой ведется разработка триодов на частоты до 20 ГГц, а на экспериментальных образцах на частоте 18 ГГц при анодном напряжении 400 В и токе до 50 мА получена мощность 50 мВт [88].

Металлокерамические триоды обеспечивают усиление и генерирование колебаний в непрерывном и импульсном режимах работы. На рис. 1.1 приведены кривые максимальных значений выходной мощности в непрерывном режиме, достигнутые на металлокерамических триодах и транзисторах. Сравнение кривых 1 и 2 свидетельствует о некотором преимуществе металлокерамических триодов в достижении более высокого уровня мощности. Однако твердотельные приборы быстро прогрессируют и, вероятно, в ближайшее время не только достигнут, но и превзойдут эти достижения, полученные на приборах с сеточным управлением. Преимущество металлокерамических триодов перед транзисторами по выходной мощности является особенно существенным при использовании приборов в импульсном режиме. В настоящее время транзисторы и другие полупроводниковые приборы совершенно неконкурентоспособны с металлокерамическими триодами, так как импульсная мощность полупроводников не на много превышает мощность в непрерывном режиме. Кроме того, они имеют несколько худшие импульсные характеристики [91].

Максимальная импульсная мощность металлокерамических триодов 8 ... 10 кВт на частотах до 0,5 ГГц,

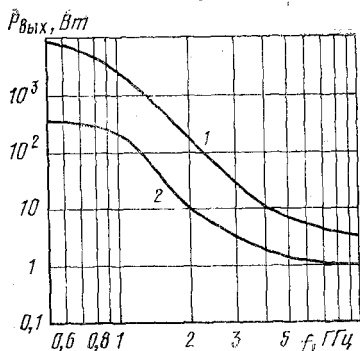


Рис. 1.1. Зависимости максимальной выходной мощности от частоты триодов с сеточным управлением (кривая 1) и транзисторов (кривая 2).

Здесь и на других графиках подобного вида приводятся огибающие кривые максимальных значений исследуемого параметра, достигнутых на различных типах приборов данного класса

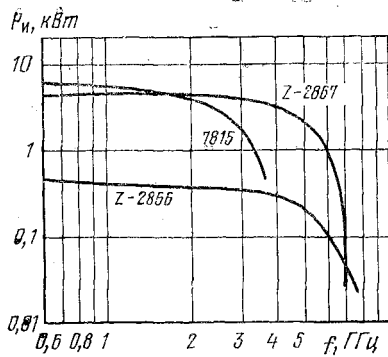


Рис. 1.2. Зависимости выходной мощности в импульсном режиме от частоты у отдельных типов триодов фирмы General Electric

6 кВт на $f=1 \dots 3$ ГГц и 2 кВт на $f \sim 6$ ГГц. На рис. 1.2 приведены кривые зависимости выходной мощности в импульсном режиме от частоты для некоторых типов металлокерамических триодов, выпускаемых фирмой General Electric. Как видно из рисунка, указанные триоды позволяют получить значительные выходные мощности в диапазоне частот до 7 ГГц.

Отличительной особенностью всех приборов с сеточным управлением

является то, что одним типом прибора может быть перекрыт очень большой диапазон частот. Для этого нужно только сочленить его с внешней колебательной системой, имеющей необходимую резонансную частоту.

КПД. Металлокерамические триоды имеют наибольший КПД на частотах менее 1 ГГц. У лучших образцов триодов этого диапазона частот он достигает 65 ... 70%. По мере увеличения рабочей частоты триодов их КПД значительно уменьшается, достигая у лучших приборов 25% на $f \approx 6$ ГГц.

В качестве примеров приборов с высокими значениями КПД можно указать отдельные триоды, выпускаемые фирмами EMI — Varian и General Electric. Фирма EMI — Varian разработала триоды 8906 и 8907AL, имеющие особо прочную металлокерамическую конструкцию, малые межэлектродные емкости и высокий коэффициент усиления. Эти приборы в режиме анодной модуляции на частоте 1,1 ГГц имеют импульсную мощность $P_n=2$ кВт при $\eta=50\%$ [91]. Фирма General Electric выпускает усилительные триоды на частоты до 6 ГГц с шириной полосы 10 ... 22%, КПД которых на частотах до 1 ГГц составляет 65%, а на частоте 6 ГГц 20% [94].

Усиление и полоса. Металлокерамические триоды обеспечивают эффективное усиление СВЧ колебаний

в непрерывном и импульсном режимах. Коэффициент усиления однокаскадного усилителя на триоде равен обычно 8,5 ... 14 дБ. Наибольшее значение относится к усилителям, работающим в диапазоне частот до 2 ... 3 ГГц. Примером приборов с наибольшими значениями коэффициента усиления является металлокерамический триод коаксиальной («карандашной») конструкции типа YD-1380, разработанный фирмой Siemens для космической аппаратуры. Этот триод на частоте 2,3 ГГц обеспечивает усиление 13 дБ при мощности в непрерывном режиме 100 Вт. Он имеет $\eta=30\%$, $m=400$ г и срок службы 10 тыс. ч [90].

Такое же большое усиление имеют и импульсные усилительные триоды. Одним из примеров может служить триод фирмы General Electric типа Y-1498, который при $P_n=5$ кВт на $f=1,3$ ГГц имеет $K_u=14$ дБ в полосе 130 МГц [88].

Усилители на триодах при применении высокочастотных колебательных систем обладают малой полосой пропускания, составляющей для большинства усилителей 1 ... 3% от номинальной частоты. Полоса усилителей может быть увеличена (до 10% и более) при применении широкополосных колебательных систем.

Габариты и масса. Плоские и коаксиальные металлокерамические триоды по сравнению со всеми остальными СВЧ приборами обеспечивают самое высокое отношение отдаваемой мощности к объему и массе прибора, что является особенно важным для бортовой аппаратуры [94]. Максимальные значения отношения полезной выходной мощности в непрерывном режиме к объему, занимаемому прибором, у современных СВЧ триодов плоской и коаксиальной конструкции составляют 25 ... 50 Вт/см³.

Габаритные размеры триодов непрерывного режима в сантиметровом диапазоне волн составляют по длине не более 30 мм и по диаметру не более 20 мм. Мощные импульсные триоды имеют несколько большие размеры: длину до 100 мм и диаметр до 50 мм. Масса триодов в зависимости от уровня мощности и рабочей частоты лежит в пределах от нескольких десятков граммов до 500 г. Типичные конструкции металлокерамических СВЧ триодов непрерывного режима показаны на рис. 1.3. На этом рисунке изображены триоды, выпускаемые фирмой General Electric, для использования в качестве генера-

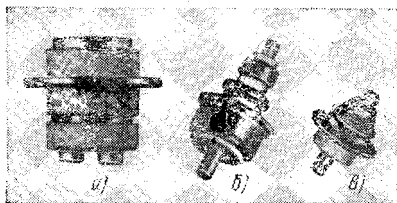


Рис. 1.3. Металлокерамические СВЧ триоды для генераторов и усилителей непрерывного режима следующих типов:

а) Y-1641, б) 7391, в) Y-1171.

торов и усилителей в диапазоне частот до 10 ГГц. Их параметры и габаритные размеры приведены в табл. 1.1.

На рис. 1.4 приведены примеры конструктивного оформления СВЧ триодов импульсного режима, выпу-

Таблица 1.1

Основные параметры металлокерамических триодов непрерывного режима

Тип прибора	f_{\max} , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	U_a , В	I_a , mA	Размеры, мм	
					длина	диаметр
Y-1600	3,0	10	300	135	26,4	19,2
Y-1266	4,0	5	300	30	24,6	12,3
Y-1641	6,0	—	150	10	12,1	12,7
7391	6,0	0,065	150	12	26,4	13,1
Y-1171	10,0	0,01	150	30	17,4	12,7
Y-1399	16,0	0,01	400	40	—	—

скаемых также фирмой General Electric. Эти триоды предназначены для работы на частотах до 3, 5 и 6 ГГц с мощностью в импульсе до 2 кВт. Параметры и габаритные размеры этих триодов приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Основные параметры металлокерамических триодов импульсного режима

Тип прибора	f_{\max} , ГГц	$P_{\text{п}}$, кВт	K_3	U_a , кВ	I_a , А	Размеры, мм	
						длина	диаметр ¹
Y-1430	1,3	1	—	2,1	0,7	—	—
Y-1498	1,3	5	—	3,4	5,0	—	—
7815	3,0	2	0,003	3,0	3,0	69	32
6442	5,0	0,5	0,001	3,0	2,5	66	20,8
7911	6,0	2,2	0,001	3,0	2,5	24,3	19,2
7910	7,5	0,1	0,001	1,0	0,6	17,2	12,3

Триоды непрерывного и импульсного режимов работают при естественном или принудительном воздушном охлаждении, выбираемом в зависимости от выходной мощности. Для этого выводы электродов триода плотно, с минимальным тепловым сопротивлением, соединяются с внешней колебательной системой, которая подвергается охлаждению. Малые размеры, жесткая конструкция, прочное крепление и соединение деталей с керамическим корпусом обеспечивают устойчивую работу триодов в тяжелых условиях эксплуатации. По механической прочности и климатической устойчивости большинство современных металлокерамических СВЧ триодов отвечает самым высоким требованиям, предъявляемым к компонентам ракетно-космической и авиационной техники.

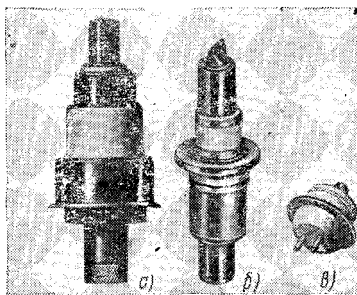


Рис. 1.4. Металлокерамические СВЧ триоды для генераторов и усилителей импульсного режима следующих типов: а) 7815, б) 6442, в) 7911.

Долговечность. Срок службы приборов СВЧ с сеточным управлением определяется качеством их изготовления и зависит главным образом от плотности тока катода. Максимальная плотность тока катода в непрерывном режиме у триодов на частотах до 10 ГГц достигает $0,8 \text{ А/см}^2$, на частотах до 16 ГГц 3 А/см^2 , а в импульсных режимах до 15 А/см^2 . Срок службы металлокерамических триодов плоской и коаксиальной конструкции в зависимости от плотности тока, рабочей частоты и уровня выходной мощности находится в пределах 2 ... 10 тыс. ч. Отдельные типы триодов имеют фактический срок службы, значительно больший 10 тыс. ч [91].

Среди приборов с большой долговечностью можно назвать ранее упомянутый металлокерамический СВЧ триод YD-1380, разработанный фирмой Siemens для применения в космической аппаратуре. Эта же фирма разработала плоский триод YD-1381 с линейными характеристиками на $f=2,15 \text{ ГГц}$ и $P_{\text{н}}=60 \text{ Вт}$. При гарантируемом сроке службы 2 тыс. ч некоторые экземпляры

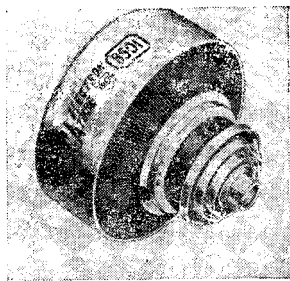
этих триодов работают свыше 10 тыс. ч [91]. Срок службы миниатюрного плоского триода Y579, выпускаемого фирмой Varian для телевизионных передатчиков 10-см диапазона, составляет 10 ... 14 тыс. ч [89]. Некоторое представление о технических и эксплуатационных характеристиках конкретных типов металлокерамических СВЧ триодов дают сведения, приведенные в табл. 1.1 и 1.2.

1.2. ТЕТРОДЫ

подавляющее большинство металлокерамических тетродов, выпускаемых в настоящее время, предназначено для использования в метровом и дециметровом диапазонах волн. Они широко применяются в телевизионной аппаратуре, многоканальных системах связи и в радиолокационных станциях. Тетроды по сравнению с триодами обеспечивают большую выходную мощность в непрерывном и импульсном режимах и позволяют достигнуть более широкую полосу пропускания при высоких коэффициентах усиления. Однако они уступают триодам по предельной рабочей частоте, ограниченной в основном из-за сложности их конструкции.

Предельная рабочая частота зарубежных металлокерамических тетродов в настоящее время не превышает 1,3 ГГц, а максимальная выходная мощность на частотах, близких к предельной, 5,5 кВт в непрерывном и 1 МВт в импульсном режимах.

Современный технический уровень тетродов СВЧ диапазона можно характеризовать данными конкретных приборов этого типа, разработанных в последнее время.



Фирмой RCA на основе ранее разработанного прибора, получившего название Гертолох и представляющего собой комбинацию тетрода и объемного резонатора в анодной цепи, создана целая серия таких приборов на диапазон частот до 1,2 ГГц. Эти приборы предназначены для применения в телевизионных передатчиках, в аппаратуре связи и радиолокации [92]. Основные пара-

Рис. 1.5. Металлокерамический тетрод 8501 типа Гертолох

Таблица 1.3

Основные параметры СВЧ тетродов непрерывного режима типа Gertrоloх

Параметры	Типы приборов			
	7213 ¹⁾	8501	7650	7842
Рабочая частота, ГГц	0,6	0,9	1,215	1,215
Выходная мощность, кВт	1,35	5,5	0,6	0,74
Анодное напряжение, кВ	3,0	7,0	2,5	1,0
Напряжение 1-й сетки, кВ	-0,3	-0,1	-0,25	-0,1
Напряжение 2-й сетки, кВ	1,0	1,5	1,2	0,3
Анодный ток, А	1,0	3,0	0,5	0,18
Напряжение накала, В	5,5	4,5	6,3	6,3
Ток накала, А	17,3	125	7,5	3,2
Длина прибора, мм	85	143	61	81,5
Диаметр прибора, мм	95,5	156	53	49
Охлаждение	Принудительное воздушное		Естественное	

¹⁾ Максимальная рабочая частота 1215 МГц.

метры отдельных наиболее высокочастотных тетродов этой серии приведены в табл. 1.3. Приборы типа Gertrоloх отличаются высокой линейностью амплитудно-частотной характеристики и имеют повышенный уровень выходной мощности. Внешний вид одного из приборов этой серии показан на рис. 1.5. Тетрод 8501 имеет металлокерамическую конструкцию с развитым радиатором со стороны анода для принудительного воздушного охлаждения и кольцевые выводы электродов.

Мощные тетроды подобной конструкции выпускаются также фирмами Siemens и Amperex Electronic. Представляют также интерес тетроды, разработанные фирмой RCA специально для применения в широкополосных усилителях с распределенным усилением. Эти тетроды имеют компактную и жесткую конструкцию, малые индуктивности выводов управляющей и экранной сеток, большой анодный ток при нулевом смещении и большой срок службы. Среди них можно отметить, например, тетрод 4624, который на $f=0,89$ ГГц имеет $P_{\text{вых}}=300$ Вт в непрерывном режиме при $U_a=2,2$ кВ и $I_a=375$ мА. Указанный тетрод работает с принудительным воздушным охлаждением и имеет длину 55,5 мм и диаметр 57,6 мм. На основе этого прибора фирмой RCA разработаны другие более мощные тетроды подобного назначе-

ний, в том числе тетроды типа 4636 и 4641. Высококачественный тетрод 4641 с линейной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) имеет небольшие габариты и может работать на частотах до 0,65 ГГц. Как показали испытания, срок службы этих приборов достигает 40 тыс. ч.

В настоящее время продолжают работы по дальнейшему совершенствованию металлокерамических тетродов в направлении повышения их качества, надежности, снижения стоимости, а также по увеличению предельных частот и выходной мощности.

1.3. МОДУЛИ НА ТРИОДАХ И ТЕТРОДАХ

Характерной особенностью современного этапа развития приборов с сеточным управлением, как и многих других приборов СВЧ, является переход от «дискретных» приборов к созданию модулей и комплексированных устройств, которые представляют собой вполне законченные функциональные узлы или блоки радиоэлектронной аппаратуры, содержащие наряду с электровакуумным прибором его колебательную систему и другие необходимые элементы.

Несмотря на улучшение понимания фирмами — разработчиками радиоэлектронной аппаратуры того, как надо правильно применять приборы СВЧ, все-таки более оптимальное использование этих приборов достигается при модульном конструировании [95]. При этом возложение всей ответственности за разработку и изготовление модуля на одну фирму обеспечивает более оптимальную конструкцию модуля и приводит к снижению общих затрат.

Создание однокаскадных автогенераторов и многокаскадных усилительных или умножительно-усилительных модулей осуществляется на основе единой технологии изготовления активных элементов (ламп) и колебательных систем, применения согласованных (по коэффициенту линейного расширения) материалов, исключения разъемных контактов и применения узлового принципа сборки модулей. Одним из распространенных конструктивно-технологических приемов изготовления модулей является предварительное армирование триодов или тетродов элементами, образующими коле-

батальную систему. Сборка активных и пассивных узлов, а также соединение их между собой осуществляется сваркой или высокотемпературной пайкой твердыми припоями на основе серебра. Все эти принципы и приемы изготовления позволяют не только оптимизировать конструкцию модуля, но и существенно повысить его механическую прочность и надежность работы.

В практике используется несколько разновидностей построения СВЧ модулей, отличающихся способом сопряжения ламп с колебательной системой. Известны модули на лампах с внешними резонаторами, с резонаторами, частично встроенными в лампу, и с резонаторами, находящимися внутри вакуумной оболочки. К последним, в частности, относятся мощные и сверхмощные электровакуумные приборы, получившие названия коакситронов и резнатронов. Коакситроны являются одними из основных приборов с сеточным управлением, обеспечивающими на сравнительно высоких частотах большую мощность, широкую полосу рабочих частот и высокую надежность.

Фирмой RCA для применения в многоканальных РЛС выпускаются коакситроны с выходной мощностью до 15 МВт в импульсе при средней мощности 150 кВт на диапазоны частот 0,185 ... 1,3 ГГц с полосой рабочих частот 10 ... 15%. Среди них можно отметить, например, коакситроны типов Y-1128, A15048 и A15194 на частоты 425, 900 и 1300 МГц соответственно с выходной мощностью до 1,5 МВт [91].

Резнатроны, представляющие собой единую конструкцию тетродного автогенератора, обеспечивают получение сверхбольших мощностей. Эти приборы в связи с трудностями поддержания вакуума, связанными с их большими размерами и объемом, обычно работают при непрерывной откачке и изготавливаются в виде разборной конструкции, позволяющей менять отдельные элементы по мере их выхода из строя. Известны некоторые типы резнатронов с отдаваемой мощностью до 100 кВт в непрерывном режиме на $f=350 \dots 650$ МГц с $\eta \approx 60\%$, работающие при анодном напряжении U_a до 16 кВ и анодном токе I_a до 10 А.

Многими зарубежными фирмами наряду с созданием однокаскадных модулей автогенераторов разрабатываются комплексированные СВЧ усилительные устройства на одном или нескольких металлокерамических триодах

и тетродах. Фирмой General Electric создан однокаскадный усилитель С-2059 на триоде Y-1538 с $P_{\text{вых}}=1,2$ кВт на $f=2,9$ ГГц. Этот усилитель в полосе 85 МГц имеет $K_{\text{у}}=8,5$ дБ. Этой же фирмой разработан многокаскадный усилитель С-2099 на трех триодах типа 14812, который на $f=5,1$ ГГц имеет $P_{\text{вых}}=180$ Вт, $K_{\text{у}}=30$ дБ в полосе 90 МГц на уровне 1 дБ. Оба усилителя разрабатывались для применения в точных бортовых высотомерах и наземных РЛС [91].

Фирмой Thomson — CSF для применения в широкодиапазонной РЛС разработан широкополосный усилитель мощности на пяти металлокерамических триодах, у которого в полосе частот 415 ... 465 МГц $P_{\text{ц}}=150$ кВт при коэффициенте заполнения $K_{\text{з}}=0,16$ и общем $K_{\text{у}}=54,5$ дБ в полосе 50 МГц (12%). В указанном усилителе используются ранее разработанные триоды ТН328, ТН308, ТН296 и ТН596, а также специально созданный мощный металлокерамический триод ТН591 с сеткой из пиролитического графита и анодом с испарительной системой охлаждения [91].

Фирма RCA для авиационных высотомеров разработала широкополосные многокаскадные усилители и умножители частоты на металлокерамических триодах «карандашной» конструкции. Они в диапазоне частот 1,04 ... 1,15 ГГц обеспечивают выходную мощность до 700 Вт при $K_{\text{у}}=28,5$ дБ [90].

Глава 2

ПРИБОРЫ МАГНЕТРОННОГО ТИПА

В качестве источников колебаний большой мощности в диапазоне СВЧ широко применяются приборы магнетронного типа (М-типа), основными достоинствами которых являются высокий КПД, компактность, сравнительно невысокие рабочие напряжения и отсутствие жестких рентгеновских излучений. К этим приборам относятся многие разновидности генераторных и усилительных приборов, работающих в скрещенных электрических и магнитных полях, в том числе импульсные магнетроны обычной конструкции, коаксиальные и коаксиально-обращенные магнетроны, митроны, магнетронные

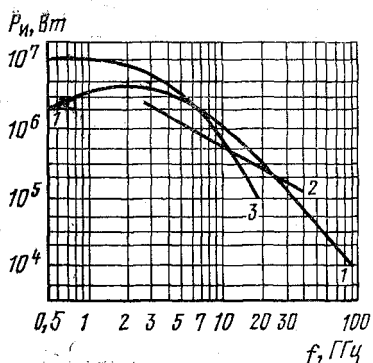


Рис. 2.1. Максимальное значение выходной мощности приборов М-типа в импульсном режиме:
 1 — магнетроны обычной конструкции;
 2 — коаксиальные магнетроны; 3 — магнетронные усилители

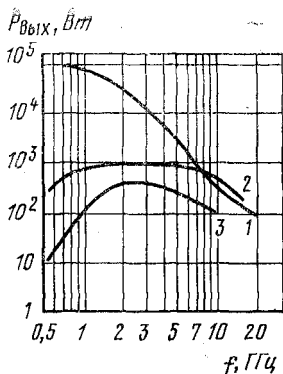


Рис. 2.2. Максимальное значение выходной мощности приборов М-типа в непрерывном режиме:
 1 — магнетроны; 2 — ЛОВМ;
 3 — митроны

усилители, магнетроны непрерывного режима и лампы обратной волны М-типа (ЛОВМ) [2, 4, 9].

С помощью приборов М-типа к настоящему времени достигнуты значительные уровни мощности как в импульсном, так и в непрерывном режимах работы. В импульсном режиме наибольшая выходная мощность получена на усилителях М-типа и на магнетронах обычной конструкции (рис. 2.1). Она достигает 10 МВт на $f=0,5 \dots 2$ ГГц, 1 МВт на $f=10$ ГГц и более 200 кВт на $f=30$ ГГц.

В непрерывном режиме получение высоких уровней выходной мощности обеспечивается с помощью магнетронов непрерывного режима и ЛОВМ (рис. 2.2). Наибольшая мощность достигнута на частотах 0,915 и 2,45 ГГц, выделенных в соответствии с международным соглашением для СВЧ нагревательной аппаратуры промышленного и бытового назначения. Она составляет на этих частотах 100 и 10 кВт соответственно. Максимальная мощность на частоте 3 ГГц равна 10 кВт, на частоте 10 ГГц — 600 Вт и на частоте около 20 ГГц — 100 Вт. Приборы М-типа отличаются от других СВЧ приборов более высокой эффективностью преобразования энергии постоянного тока в энергию СВЧ колебаний. Наиболее высокий КПД достигается на усилителях М-типа и магнетронах

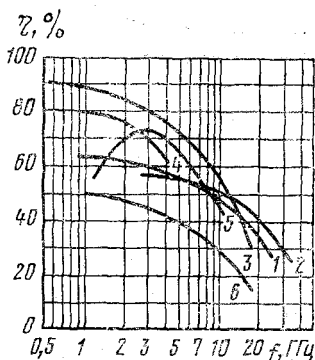


Рис. 2.3. Максимальное значение КПД приборов М-типа:

1 — импульсные магнетроны обычной конструкции; 2 — импульсные коаксиальные магнетроны; 3 — магнетронные усилители; 4 — магнетроны непрерывного режима; 5 — митроны; 6 — ЛОВМ

нетронах импульсного и непрерывного режимов работы (рис. 2.3). Приборы М-типа среди других мощных генераторных и усилительных СВЧ приборов являются наиболее компактными и характеризуются высоким отношением выходной мощности к массе прибора. При их правильном применении обеспечивается высокая надежность РЭА [19, 20].

На рис. 2.4 приведены зависимости массы (m) прибора (вместе с магнитной системой) от средней выходной мощности $P_{\text{вых}}$ для различных видов приборов М-типа. Для мощных приборов импульсного режима отношение средней мощности к массе лежит в пределах 50 ... 100 Вт/кг [71]. Более высокие значения этого

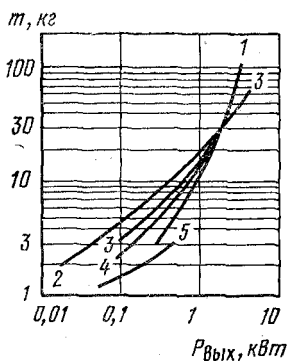


Рис. 2.4. Зависимости массы прибора от выходной мощности для различных приборов М-типа:

1 — импульсные магнетроны обычной конструкции; 2 — импульсные коаксиальные магнетроны; 3 — магнетронные усилители; 4 — ЛОВМ; 5 — митроны

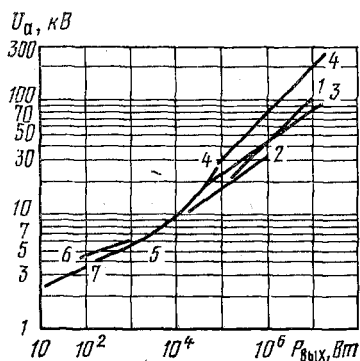


Рис. 2.5. Зависимости анодного напряжения от выходной мощности для различных приборов М-типа:

1 — импульсные магнетроны обычной конструкции; 2 — импульсные коаксиальные магнетроны; 3 — магнетронные усилители; 4 — импульсные клистроны (приведены для сравнения); 5 — магнетроны непрерывного режима; 6 — ЛОВМ; 7 — митроны

отношения достигнуты у митронов (170 Вт/кг) и магнетронов непрерывного режима (150 Вт/кг) главным образом за счет применения новых высокоэффективных магнитных материалов.

Приборы М-типа в зависимости от уровня выходной мощности работают при анодных напряжениях (U_a) 2 ... 100 кВ (рис. 2.5). На приборах других типов, например на усилительных клистродах импульсного режима, аналогичные уровни мощности достигаются при анодных напряжениях, в 1,5 ... 2 раза больших, чем у приборов М-типа. В связи с этим мощные приборы М-типа имеют сравнительно меньшие рентгеновские излучения и не требуют специальной защиты.

В настоящее время зарубежными фирмами выпускается около 1500 типов приборов магнетронного типа различных конструкций с большим разнообразием их технических и эксплуатационных характеристик [39, 40]. Количество типов приборов за последние годы практически остается неизменным, так как с появлением новых приборов происходит снятие с производства устаревших типов.

2.1. ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНЕТРОНЫ ОБЫЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Импульсные магнетроны являются самым распространенным типом СВЧ генераторов, получившим наибольшее применение в радиолокационной аппаратуре различного назначения. Эти магнетроны в зависимости от выходной мощности принято классифицировать на мощные (более 10 кВт) и маломощные (менее 10 кВт). Мощные импульсные магнетроны применяются в наземных и корабельных радиолокационных станциях поиска и слежения с большой дальностью действия, а также в бортовых радиолокационных станциях тактического назначения [27]. Области применения маломощных импульсных магнетронов более разнообразны: в самолетных доплеровских радиолокационных станциях, маяках, станциях обеспечения полета по траектории, переносных станциях обнаружения целей и в другой аппаратуре.

Технический уровень этих приборов характеризуется следующими данными.

Мощность и частота. Мощные импульсные магнетроны работают на частотах, лежащих в пределах 0,4 ...

Таблица 2.1

Параметры некоторых типов мощных импульсных магнетронов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{и}}$, МВт	U_a , кВ	I_a , А	m , кг
QK516	Raytheon	0,4...0,45	2,0	55	97	100
MCF1329 ¹⁾	Thomson—CSF	1,21...1,22	2,4	40	152	—
QKH666	Raytheon	1,32...1,35	5,0	72	150	57
M5094A	Englich Electric V.	3,0...3,2	1,0	36	80	40
M579	То же	3,05...3,16	2,5	43	170	4,5
VF30	Feranti Ltd.	5,2...5,6	1,5	25	90	—
L3030B	Litton	8,97...9,03	0,3	29	27	6,5
VF11 ¹⁾	Feranti Ltd.	9,0...9,5	1,0	33	75	—
VF20	" "	16...17	0,4	26	40	—
VF55	" "	34,6...35,4	0,1	23	20	—
M5057	Englich Electric V.	78...82	0,006	13	10	2,0
DX423	AmpereX Electronic Co.	93...97	0,008	10	30	3,5

¹⁾ С механической перестройкой частоты.

35 ГГц. Наибольшая мощность достигнута на магнетронах дециметрового диапазона волны (см. рис. 2.1). Она составляет 2,5 ... 5 МВт на частотах 0,4 ... 3 ГГц. Значительная мощность получена также в сантиметровом диапазоне и в длинноволновой части миллиметрового диапазона: ~ 1 МВт на частоте 10 ГГц и 100 кВт на частоте 35 ГГц. Имеются сведения о создании импульсного магнетрона с мощностью в импульсе 1700 МВт на частоте 3 ГГц [123]. Этот магнетрон имеет графитовый автоэлектронный катод и работает при $U_a=360$ кВ, $I_a=12$ кА и длительности импульса 30 нс. Параметры отдельных наиболее распространенных типов мощных магнетронов приведены в табл. 2.1.

Перестройка частоты. Наряду с магнетронами на фиксированные частоты отдельными фирмами выпускаются магнетроны с механической (медленной и быстрой) перестройкой частоты. Максимальный диапазон медленной перестройки достигает 5 ... 7%, а быстрой — нескольких десятков мегагерц. Отдельные типы магнетронов с быстрой перестройкой обеспечивают изменение частоты от импульса к импульсу и используются в радиолокационных станциях с селекцией движущихся целей (СДЦ). Однако в настоящее время из-за недоста-

точной стабильности частоты и малой надежности работы эти магнетроны заменяются перестраиваемыми магнетронами коаксиальной конструкции.

Стабильность частоты. Стабильность работы импульсных магнетронов характеризуется температурным коэффициентом (ТКЧ), электронным смещением (ЭСЧ) и затягиванием частоты. Для мощных импульсных магнетронов типовые значения ТКЧ составляют 30 ... 40 кГц/°С, ЭСЧ — 1,5 ... 15 МГц/А и затягивания частоты — 5 ... 60 МГц. Наименьшие значения этих параметров относятся к магнетронам дециметрового диапазона, а наибольшие — к магнетронам длинноволновой части миллиметрового диапазона.

Длительность импульса. Мощные импульсные магнетроны рассчитаны в основном на работу при длительности импульса ~ 1 мкс, однако отдельные типы магнетронов допускают работу при длительностях до 5 ... 10 мкс. Коэффициент заполнения обычно 0,1 ... 0,2%.

КПД. Для мощных магнетронов достижение высоких значений КПД имеет особо важное значение. Поэтому все меры, предпринимаемые для его повышения, прежде всего реализованы при конструировании мощных магнетронов. Лучшие значения КПД приведены на рис. 2.3 и составляют 80 ... 85% в дециметровом диапазоне, 80% на частоте 3 ГГц, 55% на частоте 10 ГГц и 30% на частоте 35 ГГц.

Масса. Мощные импульсные магнетроны как пакетированные, так и с внешней магнитной системой имеют довольно большую массу, которая у самых мощных магнетронов дециметрового диапазона достигает 100 кг.

Долговечность. Гарантируемый срок службы мощных импульсных магнетронов находится в пределах 1 ... 2 тыс. ч. Фактический средний срок службы многих типов магнетронов достигает 10 тыс. ч. Среди магнетронов, обладающих большой долговечностью, можно отметить, например, магнетрон MAG21 фирмы M—O Valve Co. 3-см диапазона с $P_{и}=100$ кВт, гарантируемый срок службы которого 2 тыс. ч [105]. У магнетрона VMX1090 фирмы Varian, работающего в том же диапазоне частот с $P_{и}=200$ кВт, ожидаемый срок службы 3 тыс. ч [41].

Мощные импульсные магнетроны выпускаются преимущественно пакетированной конструкции с постоянными магнитами и с принудительным или естественным охлаждением. Вывод СВЧ энергии у магнетронов деци-

метрового диапазона коаксиальный, а у магнетронов сантиметрового и миллиметрового диапазонов — волноводный.

Характерным примером конструктивного оформления современных мощных импульсных магнетронов является магнетрон типа F1103 фирмы Thomson—CSF. Этот магнетрон имеет пакетированную конструкцию, волноводный вывод СВЧ энергии и рассчитан на работу с механической перестройкой частоты в диапазоне 8,5 ... 9,6 ГГц. Его $P_{\text{и}}=200$ кВт при коэффициенте заполнения 0,001, $U_{\text{а}}=22,5$ кВ и $I_{\text{а}}=27,5$ А [80].

Выпуск мощных импульсных магнетронов обычной конструкции с каждым годом сокращается. Это связано с тем, что в новой радиоэлектронной аппаратуре применяются преимущественно коаксиальные магнетроны, обладающие значительными преимуществами по сравнению с магнетронами обычной конструкции [118]. Среди импульсных магнетронов значительную часть составляют магнетроны малой мощности, которые широко применяются в различной радиоэлектронной аппаратуре. В настоящее время из 770 типов рекламируемых магнетронов обычной конструкции более 320 типов относятся к числу магнетронов малой мощности [71].

Технический уровень маломощных импульсных магнетронов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Магнетроны малой мощности созданы на частоты 0,35 ... 97 ГГц (наибольшее число типов на 8 ... 10 ГГц). Выходная мощность магнетронов в пределах 100 Вт ... 10 кВт в импульсе. Некоторое представление о параметрах маломощных импульсных магнетронов дают данные, приведенные в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Параметры отдельных типов маломощных импульсных магнетронов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{и}}$, кВт	$U_{\text{а}}$, кВ	$I_{\text{а}}$, А	m , кг
BLM167	Varian	5,2...5,7	0,9	2,8	1,5	0,29
BL250	"	5,4...5,9	0,15	1,35	1,0	0,23
M5097	Electric Valve	9,2...9,6	6,75	4,6	6	1,25
VJ1390	AmpereX	9,38...9,44	1,4	2,2	2,5	1,0
M5117	Electric Valve	9,40...9,72	9	5,6	5,0	—
MAG17	"	9,0...11,0	0,18	0,9	1,0	0,24
BLM162	Varian	16,4...16,6	10	9	5,25	0,57
MA286	Microwave Ass.	35,7...36,2	1	3,6	1,75	0,46

Перестройка частоты. Маломощные магнетроны выпускаются на фиксированные частоты, а также с механической и электромеханической перестройкой частоты. Диапазон механической перестройки частоты составляет 5 ... 7% от номинальной частоты, при электромеханической перестройке — 2 ... 3%.

Стабильность частоты. У маломощных магнетронов, как и у всех магнетронов обычной конструкции, стабильность частоты колебаний зависит от изменений температуры окружающей среды, КСВ нагрузки и анодного тока магнетрона и характеризуется соответствующими коэффициентами. Минимальное значение температурного коэффициента частоты (ТКЧ) для магнетронов, работающих в диапазонах частот 3 ... 16 ГГц, составляет 30 ... 40 кГц/°С. Это достигается заменой медной резонаторной системы молибденовой и введением в конструкцию магнетрона элементов термокомпенсации. Например, минимальное значение ТКЧ 30 кГц/°С имеет магнетрон ВLM207 фирмы Varian на $f=9,3$ ГГц с $P_{\text{н}}=0,55$ кВт при $K_{\text{з}}=0,002$, $U_{\text{а}}=2,4$ кВ и $I_{\text{а}}=1,2$ А в импульсе.

Коэффициент затягивания частоты, характеризующий влияние рассогласования нагрузки на частоту магнетрона, обычно лежит в пределах 1,5 ... 60 МГц при предельно допустимых значениях КСВ. Например, минимальное затягивание частоты 2 МГц имеет магнетрон ВLM153 той же фирмы на $f=5,7$... 5,8 ГГц с $P_{\text{н}}=5$ кВт при $K_{\text{з}}=0,001$, $U_{\text{а}}=5$ кВ и $I_{\text{а}}=4,5$ А в импульсе.

Коэффициент электронного смещения частоты маломощных магнетронов обычно лежит в пределах 1,5 ... 30 МГц/А. Например, минимальное электронное смещение частоты 1,5 МГц/А имеет магнетрон М5031 фирмы English Electric V. на $f=9,35$ ГГц с $P_{\text{н}}=9,5$ кВт при $K_{\text{з}}=0,0025$, $U_{\text{а}}=6,2$ кВ и $I_{\text{а}}=5,5$ А в импульсе.

Для повышения стабильности частоты маломощных импульсных магнетронов в некоторых случаях используются способы стабилизации частоты от внешнего высокостабильного СВЧ генератора. Эти способы наряду со стабилизацией частоты могут применяться и для управления фазой импульсов выходного сигнала.

Время готовности. Для магнетронов, используемых в отдельных видах радиоэлектронных устройств (например, в бортовой аппаратуре ракет), очень важным параметром является их время готовности. У магнетро-

нов такого назначения время готовности, отсчитываемое с момента включения напряжений накала и анодного блока до достижения 80% уровня выходной мощности, равно 2 ... 10 с. Для получения такого малого времени готовности при конструировании магнетронов принимаются специальные меры по обеспечению наиболее быстрого разогрева катода (уменьшение массы катода, применение специальных материалов и снижение рабочей температуры катода). Примером магнетрона с малым временем готовности может служить магнетрон типа MAG17, параметры которого приведены в табл. 2.2. Время готовности этого магнетрона менее 3 с.

Длительность импульса. Для магнетронов малой мощности большое значение имеет возможность работы при малых длительностях импульсов, особенно при использовании их в бортовых высотомерах (альтиметрах). Так как маломощные магнетроны обладают очень малым временем установления СВЧ колебаний и малым дрожанием фронта импульса, они позволяют работать при очень коротких импульсах — длительностью до 10 нс. Эти же магнетроны нормально работают при обычных длительностях импульсов 1 ... 2 мкс.

Анодное напряжение. Маломощные импульсные магнетроны в зависимости от мощности и рабочей частоты работают при $U_a=0,8 \dots 10$ кВ. Минимальные значения относятся к магнетронам длинноволновой части сантиметрового диапазона с выходной мощностью в несколько сотен ватт, а максимальные — к магнетронам коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов с $P_{\text{вых}}$ до 10 кВт.

Масса. Маломощные импульсные магнетроны являются очень компактными приборами и имеют небольшую массу ($m=0,2 \dots 2$ кг) [71].

Наименьшую массу имеют магнетроны коротковолновой части сантиметрового диапазона с $P_{\text{н}}=40 \dots 250$ Вт и $P_{\text{ср}}=0,2 \dots 2,5$ Вт. Эти магнетроны разработаны фирмами Varian и Microwave Ass. и имеют $m=0,2 \dots 0,35$ кг. Среди них самым легким является магнетрон BL212, работающий на $f=5,4 \dots 5,9$ ГГц с $P_{\text{н}}=100$ Вт. Его $m=185$ г. У магнетрона типа M5021 фирмы English Electric V. $m \approx 1$ кг. Он имеет фиксированную рабочую частоту в диапазоне 9,38 ... 9,44 ГГц и волноводный вывод СВЧ энергии, $P_{\text{н}}=1,4$ кВт при $K_a=0,1\%$, $U_a=2$ кВ и $I_a=2,25$ А [81].

Маломощные импульсные магнетроны продолжают играть важную роль в радиоэлектронной аппаратуре несмотря на развитие твердотельных СВЧ генераторов. Они являются наиболее предпочтительными для применения в аппаратуре потому, что позволяют не только достигнуть необходимой мощности и частоты колебаний, но и обладают преимуществами перед твердотельными генераторами СВЧ по КПД, частотной стабильности, возможности работы при очень малых длительностях импульсов и т. д. Этим, в частности, и объясняется то, что выпуск импульсных магнетронов практически не уменьшается.

2.2. КОАКСИАЛЬНЫЕ МАГНЕТРОНЫ

Коаксиальные магнетроны в отличие от обычных многорезонаторных имеют дополнительный стабилизирующий резонатор коаксиального типа (рис. 2.6). Наличие этого резонатора, вынесенного из пространства взаимодействия с электронным потоком и обладающего высокой нагруженной добротностью, обеспечивает повышенную частотную стабильность магнетрона, а также большую долговечность и высокую надежность работы. Указанные достоинства коаксиальных магнетронов особенно важны в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн, где магнетроны обычной конструкции имеют малую долговечность и недостаточную надежность.

Коаксиальные магнетроны благодаря этим преимуществам вытесняют магнетроны обычной конструкции не только во вновь разрабатываемой и модернизируемой радиоэлектронной аппаратуре, но и в аппаратуре, находящейся в эксплуатации. Утверждается, что замена обычного магнетрона коаксиальным возможна практически в любой аппаратуре при ее незначительной доработке [108]. В настоящее время среди всех видов магнетронов более 60% составляют магнетроны коаксиальной конструкции.

Мощные коаксиальные магнетроны применяются в наземных и корабельных радиолокационных станциях поиска и слежения, а магнетроны среднего уровня мощности — в радиолокационных станциях обзора, управления стрельбой, обеспечения полета по траектории, повторяющей рельеф местности, а также в навигационной и

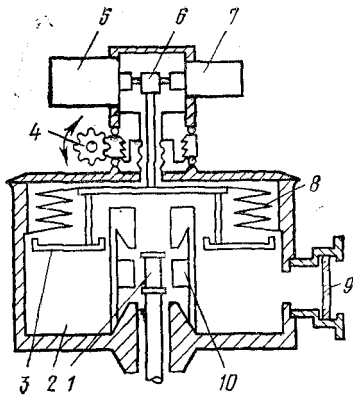


Рис. 2.6. Принцип устройства коаксиального магнетрона с механизмом вибрационной перестройки частоты:

1 — катод; 2 — коаксиальный резонатор; 3 — настроенный поршень; 4 — механизм медленной перестройки частоты; 5 — мотор; 6 — эксцентрик; 7 — управляющее устройство; 8 — сильфоны; 9 — окно вывода СВЧ энергии; 10 — ламели резонаторов

и средней мощностью от нескольких ватт до 2,2 кВт (см. рис. 2.1). Из них наибольшее число предназначено для работы в коротковолновой части сантиметрового диапазона [67].

Необходимость дальнейшего увеличения долговечности и повышения надежности импульсных генераторов миллиметрового диапазона волн привели к созданию еще одной разновидности магнетронов, получивших название обращенно-коаксиальных (рис. 2.7). В отличие от коаксиальных дополнительный стабилизирующий резонатор обращенно-коаксиального магнетрона расположен внутри прибора, а кольцевой катод — с его внешней стороны. Такая конструкция позволяет значительно развить катодную часть магнетрона и снизить удельную нагрузку катода и соответственно повысить долговечность прибора в целом. Обращенно-коаксиальные магнетроны созданы на частотах 20 ... 35 ГГц с $P_{\text{н}}=10$... 150 кВт, однако практического применения в аппаратуре они пока не получили [75].

метеорологической аппаратуре на борту самолетов и кораблей. Маломощные коаксиальные магнетроны (с $P_{\text{н}} < 10$ кВт) используются в маяках, приемопередатчиках, импульсных доплеровских системах на борту самолетов и ракет, а также в портативных радиолокационных станциях [39, 64].

За рубежом выпускается более 200 типов коаксиальных магнетронов на различные частоты и уровни мощности, предназначенных исключительно для работы в импульсных режимах [67]. Технический уровень этих магнетронов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Коаксиальные магнетроны созданы на частоты 2,7 ... 35 ГГц с $P_{\text{н}}=0,2$ кВт ... 3 МВт

Перестройка частоты.

Большинство коаксиальных магнетронов позволяет производить перестройку рабочей частоты. При этом медленная перестройка может производиться в пределах до 13% от номинальной частоты, а быстрая — в пределах до 5% в зависимости от применяемого способа перестройки рабочей частоты и мощности. Максимальные пределы быстрой перестройки частоты для магнетронов с вибрационной перестройкой достигают 5%, с электромагнитной — 3,5%, с гиронастройкой — 2% и с пьезоэлектрической перестройкой — 1% от номинальной частоты. Максимальная скорость перестройки при этом у магнетронов с вибрационной перестройкой составляет 220, с электромагнитной — 400, с гиронастройкой — 800 и с пьезоэлектрической перестройкой — 1000 циклов в секунду (см. табл. 2.4).

Способы быстрой перестройки магнетронов продолжают непрерывно совершенствоваться для достижения более высокой скорости и повышения срока службы применяемых механизмов перестройки. Наряду с совершенствованием способов быстрой электромеханической перестройки зарубежными фирмами проводятся интенсивные исследования по осуществлению электронной перестройки частоты импульсных магнетронов. В частности, фирмами Thomson—CSF и Raytheon разработаны магнетроны 2- и 3-см диапазонов с перестройкой частоты при помощи ферритовых пластин, расположенных в дополнительном резонаторе и управляемых магнитным полем специального электромагнита [118]. Фирмой Varian ведется разработка коаксиального магнетрона 2-см диапазона, перестройка частоты которого осуществляется с помощью $p-i-n$ -диодов, являющихся реактивной нагрузкой коаксиального резонатора [118].

Применение указанных способов электронной перестройки частоты позволяет существенно увеличить ско-

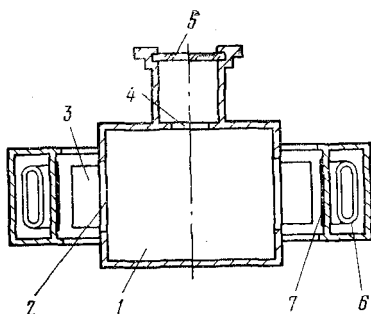


Рис. 2.7. Принцип устройства обращенно-коаксиального магнетрона:

- 1 — внутренний резонатор; 2 — щели связи; 3 — резонаторная система (ламели); 4 — диафрагма связи с выводом СВЧ энергии; 5 — вакуумный уплотнитель окна вывода энергии; 6 — подогреватель катода; 7 — кольцевой катод

рость перестройки и обеспечить внутримпульсное кодирование сигналов передающего устройства радиолокационных станций. Некоторые магнетроны по способу перестройки частоты являются многорежимными. Они могут работать на фиксированной частоте, с медленной перестройкой, с быстрой прецизионной перестройкой и с перестройкой частоты от импульса к импульсу [105]. Это расширяет области применения магнетронов и позволяет использовать их в многофункциональных помехозащищенных радиолокационных станциях.

Стабильность частоты. Коаксиальные магнетроны по сравнению с обычными характеризуются более высокой стабильностью частоты потому, что их частотные параметры (электронное смещение частоты, ТКЧ, коэффициент затягивания частоты, уходы частоты от импульса к импульсу) значительно лучше, чем у магнетронов обычной конструкции.

Электронное смещение частоты коаксиальных магнетронов находится в пределах от 10 кГц/А в 10-см диапазоне до 1 МГц/А в 8-мм, что в 3 ... 10 раз меньше значений этого параметра у обычных магнетронов. ТКЧ коаксиальных магнетронов также в 2 ... 3 раза меньше, чем у магнетронов обычной конструкции, так как внешний резонатор удален от источника тепла и обычно изготавливается из инвара, а не из меди. Минимальные значения ТКЧ составляют ~60 кГц/°С на частоте 3 ГГц, 100 кГц/°С на частотах до 10 ГГц и 150 кГц/°С на частотах до 35 ГГц.

Коэффициент затягивания частоты у лучших коаксиальных магнетронов при КСВ нагрузки ~1,5 равен 2 МГц на частоте 3 ГГц, 5 МГц на частотах до 16 ГГц и 15 МГц на частотах до 35 ГГц, что также в 3 ... 5 раз меньше, чем у магнетронов обычной конструкции. Коаксиальные магнетроны, кроме того, характеризуются малыми значениями ухода частоты от импульса к импульсу, составляющими десятки килогерц на частотах до 16 ГГц. По количеству пропущенных импульсов они почти на порядок лучше обычных магнетронов. Количество пропущенных импульсов у многих типов коаксиальных магнетронов составляет 0,1 ... 0,25%, а у лучших образцов — 0,05%.

Указанные преимущества коаксиальных магнетронов являются особенно важными при использовании этих

приборов в радиолокационных станциях с селекцией движущихся целей (СДЦ).

КПД. В коротковолновой части сантиметрового диапазона КПД коаксиальных магнетронов, как правило, несколько выше сопоставимых магнетронов обычной конструкции. Максимальные значения КПД в зависимости от рабочей частоты находятся в пределах 26 ... 56% (см. рис. 2.3).

Масса. Несмотря на то, что коаксиальные магнетроны имеют несколько больший диаметр анода, их масса не превышает массу магнетронов обычной конструкции. Это объясняется тем, что высота анодного блока этих магнетронов меньше и соответственно меньше зазор в магнитной системе, а поэтому меньше габариты и масса постоянных магнитов. Минимальные значения массы магнетронов в зависимости от импульсной мощности составляют 20 ... 25 кг при $P_{и}=1$ МВт, около 3 кг при $P_{и}=100$ кВт и 1 ... 2 кг при $P_{и}=10$ кВт.

Долговечность. Гарантируемый срок службы коаксиальных магнетронов находится в пределах 1 ... 5 тыс. ч. Наибольший гарантируемый срок службы (5 тыс. ч) имеют отдельные типы магнетронов, выпускаемые фирмой EMI—Varian. Фактический срок службы составляет 3 ... 10 тыс. ч, а при работе в некоторых действующих системах он достигает 30 тыс. ч [106].

Высокие значения долговечности обеспечиваются благодаря применению в этих приборах некоторых мер по снижению напряженности СВЧ поля в пространстве катод — анод, уменьшению бомбардировки катода и распылению его активного вещества, увеличению числа резонаторов и соответственно снижению удельной мощности, рассеиваемой на ламелях резонаторов, а также за счет исключения из конструкции магнетрона пробоеопасных связей между резонаторами. Применение коаксиальных магнетронов вместо магнетронов обычной конструкции позволяет увеличить долговечность радиоэлектронной аппаратуры в 5 раз [108].

Некоторое представление о параметрах и электрических режимах работы импульсных коаксиальных магнетронов дают сведения, приведенные в табл. 2.3 и 2.4. В табл. 2.3 в качестве примера приведены данные отдельных типов мощных коаксиальных магнетронов [69, 104]. Среди них приведен, в частности, один из наиболее мощных приборов — магнетрон 10-см диапазона типа

Таблица 2.3

**Основные параметры некоторых типов мощных
коаксиальных магнетронов**

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{и}}$, МВт	$P_{\text{ср}}$, кВт	U_a , кВ	I_a , А	m , кг
VMS1143	Varian of Canada	2,7	3	2,8	—	—	—
SFD356	Varian	2,85...3,91	2	2,2	58	90	39
SFD383	"	2,25...5,4	1	1	38	65	26
SFD303	"	9,33...9,4	1	1	34,5	65	21
MCV1300	Thomson—CSF	8,5...9,6	0,2	0,2	23	27,5	6
L7208	Litton	15,8...17,2	0,1	0,1	20	20	6,4
QKH1663	Raytheon	32,1...33,1	0,07	0,06	18	3,6	5,9

VMS1143. В табл. 2.4 даны примеры коаксиальных магнетронов с различными способами перестройки частоты, в том числе магнетронов с электронной перестройкой, разрабатываемых и выпускаемых в последнее время [108—110]. Наибольшие скорости перестройки частоты (ν) достигнуты при применении пьезоэлектрической и $p-i-n$ -диодной перестройки.

Таблица 2.4

**Основные параметры коаксиальных магнетронов
с различными способами перестройки частоты**

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	Способ перестройки частоты	$P_{\text{и}}$, кВт	Δf , МГц	ν , цкл./с
SFD354	Varian	9,0...9,5	Вибрационный	200	500	25
SFD345	"	16,5...17,1	То же	35	400	150
Нет свед.	"	15	Электромагнитный	85	500	400
L5498	Litton	15	Гиронастройка	65	300	800
VMA1043	Varian	34...35	Вибрационный	56	300	150
M5059	Englich Electric Co.	35,5	Пьезоэлектрический	50	350	1000
7008	Thomson—CSF	8,9...9,3	Ферритовый	200	55...65	—
Экспериментальный	Varian	16	$p-i-n$ -диодный	60	300	До 100 МГц/мкс

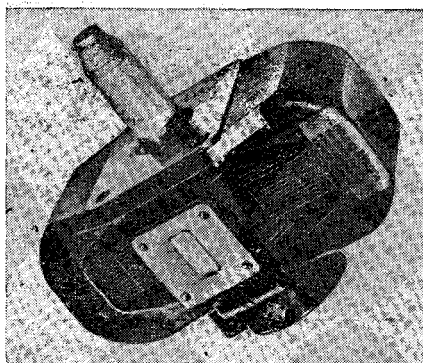


Рис. 2.8. Коаксиальный импульсный магнетрон типа YJ1210

Современные коаксиальные магнетроны имеют преимущественно пакетированную конструкцию с волноводными выводами СВЧ энергии (рис. 2.8). На рисунке приведена фотография внешнего вида импульсного коаксиального магнетрона типа YJ1210, выпускаемого фирмой AEG—Telefunken. Этот магнетрон рассчитан на работу на $f=8,5 \dots 9,6$ ГГц, $P_{\text{н}}=250$ кВт при коэффициенте заполнения 0,001, $U_{\text{а}}=23$ кВ и $I_{\text{а}}=27,5$ А. Магнетрон YJ1210 имеет пакетированную конструкцию с механической перестройкой частоты в указанном диапазоне, волноводный вывод СВЧ энергии и общую массу 6,2 кг [69].

2.3. МАГНЕТРОНЫ НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА

Магнетроны непрерывного режима применяются для СВЧ нагревательной аппаратуры промышленного и бытового назначения, а также в бортовой радиотехнической аппаратуре навигации, поиска и слежения. За рубежом выпускается более 80 типов этих магнетронов, причем около 70% из них предназначено для СВЧ нагрева [71].

С большим успехом они применяются в пищевой промышленности для стерилизации, сохранения свежести и приготовления пищевых продуктов, в медицине для диатермии, в производстве пластмасс, а также для сушки некоторых материалов и продуктов (например, древесины, фоторезиста и др.). Особенно массовое применение указанные магнетроны получили в бытовых СВЧ

печах, производство которых из года в год увеличивается в связи с возрастающим спросом населения. СВЧ печи стали популярными среди населения потому, что они обеспечивают сокращение времени приготовления пищи, экономии электрической энергии и возможность использования относительно дешевых замороженных продуктов [118]. Ожидается, что в 1980 г. объем выпуска СВЧ печей составит в США около 2 млн. шт., а в Японии до 5 млн. шт. в год.

Магнетроны непрерывного режима, по оценкам зарубежных специалистов, являются наиболее подходящими источниками СВЧ энергии для бытовых печей, так как они наиболее компактны, экономичны, надежны и имеют наименьшую стоимость изготовления. Эти преимущества магнетронов сохраняются и при использовании для этих целей твердотельных источников СВЧ энергии, особенно по КПД и стоимости [39].

Технический уровень магнетронов непрерывного режима характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Магнетроны непрерывного режима выпускаются для работы на $f=0,35 \dots 10,5$ ГГц. Наибольшее число типов этих магнетронов создано на частоты 0,915 и 2,45 ГГц, выделенные в соответствии с международным соглашением для СВЧ нагрева.

Долгое время наибольшая мощность магнетронов для СВЧ нагрева составляла 25 кВт. В последние годы $P_{\text{вых}}$ этих приборов была значительно повышена. Сначала японской фирмой NJRC был разработан магнетрон типа M1265 с $P_{\text{вых}}=60$ кВт, а затем канадскими фирмами Atomic Energy of Canada Ltd. и Varian Ass. of Canada Ltd. был создан магнетрон в этом же диапазоне частот с $P_{\text{вых}}=100$ кВт (см. табл. 2.5). Полученная мощность не является предельной. По мнению канадских специалистов, на базе разработанной ими конструкции можно повысить $P_{\text{вых}}$ этих магнетронов до 250 кВт [119].

У магнетронов, предназначенных для радиотехнической аппаратуры, максимальная $P_{\text{вых}}=200$ Вт на частотах 0,35 ... 2,5 ГГц и $P_{\text{вых}}=300$ Вт на частоте ~ 10 ГГц. У магнетронов для бытовых печей на $f=2,45$ ГГц типовая $P_{\text{вых}}=600 \dots 800$ Вт.

КСВ. Отличительной особенностью магнетронов, предназначенных для СВЧ нагрева, является их работа на рассогласованную нагрузку. Это объясняется тем, что

Таблица 2.5

Основные параметры магнетронов непрерывного режима для СВЧ нагрева

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, кВт	η , %	U_a , кВ	I_a , А	m , кг
Для промышленного СВЧ нагрева							
Нет свед.	AEG—Telefunken	0,915	100	78	30	5,0	—
M1265	New Japan Radio	0,915	60	71	20	4,25	30
8684	RCA	0,915	30	69	14,5	3,0	10
YJ1191	Ampereх Electronic	2,45	6	65	7,5	1,25	5
Для бытовых СВЧ печей							
2M53	Toshiba	2,45	0,8	70	4,5	0,35	1,7
2M69	"	2,45	1,5	60	2,5	1,0	2,7
L5260A	Litton	2,45	0,8	70	3,5	0,4	1,35
YJ1500	Ampereх Electronic	2,45	1,1	72	4,0	0,38	—
2M71	Hitachi	2,45	0,88	65	4,0	0,35	2,0

СВЧ характеристики обрабатываемых материалов и продуктов существенно меняются во времени под воздействием высокочастотной мощности. Максимально допустимые КСВ нагрузки для большинства магнетронов при питании от нестабилизированного выпрямителя находятся в пределах от 4 (при длительной работе) до 8 ... 10 (при кратковременных воздействиях). При питании от выпрямителя с фильтрацией возможна стабильная работа магнетрона при КСВ нагрузки, достигающих 8 ... 10, а при питании от сети переменного тока со значительными пульсациями напряжения допустимый КСВ нагрузки уменьшается до 2 ... 4.

КПД. Наибольшие КПД достигнуты у мощных магнетронов, предназначенных для СВЧ нагрева. Большинство этих магнетронов имеют КПД $\approx 70\%$. У отдельных типов магнетронов дециметрового диапазона КПД $\approx 78 \dots 80\%$ (см. табл. 2.5).

Долговечность. Повышение долговечности генераторов СВЧ является одной из ключевых проблем удешевления СВЧ энергии. За последние 5 лет фирмам США и Японии (Litton, Toshiba, Hitachi) удалось повысить срок службы магнетронов непрерывного режима с 500 до 2000 ч. До 1975 г. гарантируемый срок службы магне-

тронов при использовании в бытовых СВЧ печах с учетом ежедневного трехразового включения составлял 2 ... 5 лет. В настоящее время прогнозируемый срок службы указанных СВЧ печей при использовании отдельных типов магнетронов (например, L5260A и 2M71) составляет 10 лет, т. е. приближается к долговечности обычных газовых и электрических плит [118].

Параметры отдельных типов магнетронов для промышленного нагрева и бытовых СВЧ печей приведены в табл. 2.5. Среди магнетронов, предназначенных для бытовых СВЧ печей, наиболее распространенным в Европе, США и Японии является магнетрон типа 2M53. Он выпускается японской фирмой Toshiba в больших количествах (около 200 тыс. шт. в год) и является самым дешевым магнетроном для СВЧ печей. Его производственная цена составляет всего 19 долл. [111]. Среди американских магнетронов следует отметить магнетрон типа L5260A, выпускаемый фирмой Litton. Этот магнетрон вместе с магнитной системой и фильтром имеет $m=1,35$ кг. Его габаритные размеры не превышают $114 \times 127 \times 123$ мм. Стоимость этого магнетрона при изготовлении в больших количествах может быть снижена до 30 долл. [111].

Магнетроны для промышленного нагрева в большинстве случаев имеют внешнюю магнитную систему на постоянных магнитах или электромагнитах и систему

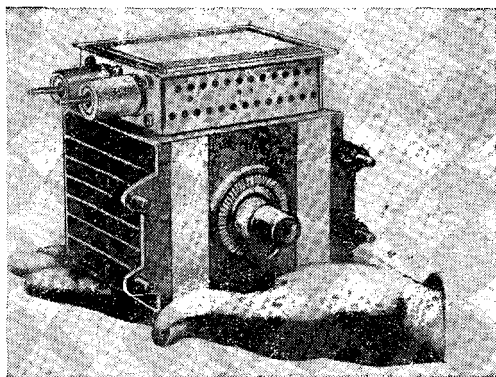


Рис. 2.9. Магнетрон непрерывного режима типа MA8000 для бытовых СВЧ печей

принудительного жидкостного или воздушного охлаждения. Для защиты от перегрузок в этих магнетронах применяют внешние или встроенные СВЧ изоляторы в виде трехплечных ферритовых циркуляторов с водяной нагрузкой, а для снижения паразитного излучения — встроенные катодные СВЧ фильтры. В сверхмощных магнетронах принимаются дополнительные меры по повышению электрической прочности керамического окна вывода СВЧ энергии и по его охлаждению.

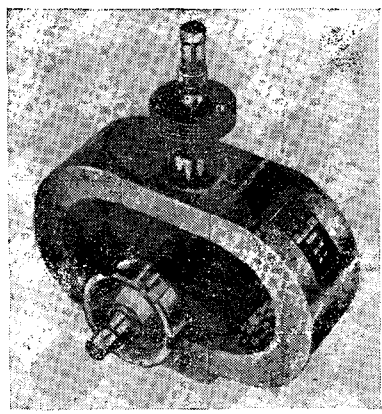


Рис. 2.10. Магнетрон непрерывного режима типа F1123 для промышленного СВЧ нагрева

Для этой цели используют керамику с повышенной теплопроводностью и систему охлаждения окна с помощью тепловых трубок [119].

Магнетроны для бытовых печей выпускаются в основном с встроенной магнитной системой на постоянных магнитах, имеют прямоканальный катод из торрированного вольфрама с малой тепловой инерцией и радиатор для естественного или принудительного воздушного охлаждения. В большинстве этих магнетронов в целях предотвращения утечки высокочастотной энергии через катодную ножку применяют встроенные катодные СВЧ фильтры.

На рис. 2.9 показан внешний вид магнетрона для бытовых СВЧ печей, работающего на $f=2,455$ ГГц с $P_{\text{вых}}=600$ Вт в непрерывном режиме. Магнетрон MA8000 выпускается японской фирмой Sanyo Electric. Он имеет очень малые габаритные размеры и $m \approx 1$ кг [124].

Примером конструктивного оформления генераторов, предназначенных для промышленного СВЧ нагрева, является магнетрон F1123, выпускаемый фирмой Thomson—CSF. Внешний вид этого магнетрона показан на рис. 2.10. Магнетрон F1123 при работе на фиксированной частоте в пределах 2,43 ... 2,47 ГГц имеет $P_{\text{вых}}=5$ кВт при $U_a=5,2$ кВ и $I_a=1,6$ А. Его масса 6,5 кг.

2.4. МИТРОНЫ

Среди СВЧ приборов магнетронного типа особое место занимают митроны, рабочая частота которых перестраивается изменением анодного напряжения. Электронная перестройка частоты в этих приборах обеспечивается с помощью замедляющих систем со слабо выраженными резонансными свойствами. В качестве таких систем применяются встречные штыри, расположенные вокруг катода по образующей цилиндра (рис. 2.11). Митроны по сравнению с другими видами СВЧ генераторов имеют линейную зависимость частоты от управляющего напряжения и меньшую неравномерность амплитудно-частотной характеристики [9, 28].

Благодаря указанным достоинствам эти приборы получили достаточно широкое применение в различной радиоэлектронной аппаратуре. В настоящее время митроны успешно применяются в качестве гетеродинов приемных устройств, свип-генераторов в панорамных измерительных приборах и быстроперестраиваемых задающих генераторов в аппаратуре радиопротиводействия. Митроны с повышенной выходной мощностью используются в передающих устройствах радиовзрывателей, альтиметрах, измерительных генераторах, в качестве возбуждателей мощных СВЧ приборов, а также в передатчиках станций заградительных помех и в аппаратуре связи.

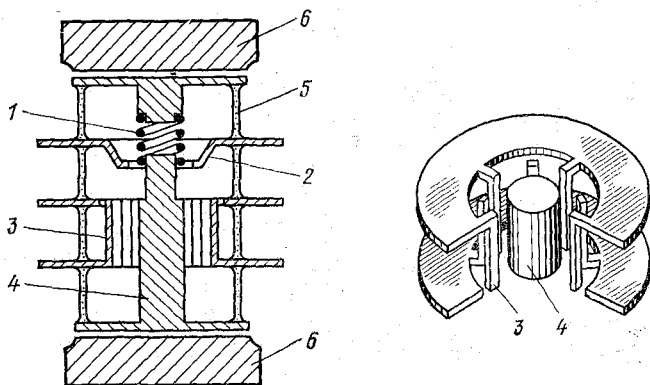


Рис. 2.11. Принцип устройства митрона:

1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — замедляющая система (встречные штыри); 4 — «холодный» катод; 5 — керамические кольца (корпус); 6 — магниты

За рубежом выпускается более 170 типов митронов на различные рабочие частоты и мощности, предназначенных исключительно для работы в непрерывном режиме. В последнее время отмечается значительное сокращение разработок и производства митронов малой мощности, связанное с расширением выпуска твердотельных СВЧ приборов, которые полностью заменяют многие маломощные электровакуумные приборы, в том числе и митроны.

Технический уровень митронов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Существующие митроны работают в диапазоне частот 0,2 ... 11 ГГц; большинство митронов рассчитано на работу в диапазоне $f=2 \dots 4$ ГГц [107]. Выходная мощность митронов составляет 10 мВт ... 500 Вт. По мощности приборы этого типа можно условно разделить на три группы: маломощные, средней мощности и мощные. Маломощные митроны с $P_{\text{вых}}=10$ мВт ... 1 Вт работают в диапазоне частот 0,2 ... 11 ГГц. Наиболее распространенными являются митроны средней мощности (1 ... 10 Вт), работающие в диапазоне частот 0,4 ... 7 ГГц.

Митроны с $P_{\text{вых}} > 10$ Вт относятся к числу мощных. Самым мощным среди известных приборов этого типа является митрон 500S 2,9—3,1, выпускаемый фирмой Micron. Максимальная мощность митронов составляет 100 Вт на $f=1$ ГГц, 500 Вт на $f=3$ ГГц и 100 Вт на $f=10$ ГГц (см. рис. 2.2). Недавно фирмой Micron разработан митрон типа 500S2,45 с $P_{\text{вых}}=500$ Вт на $f=2,45$ ГГц, предназначенный для использования в быто-

Таблица 2.6

Основные параметры маломощных митронов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	$U_{\text{а max'}}$, кВ	$I_{\text{а'}}$, мА
0,25P0,35—1S	Micron	0,35...1	0,25	2,4	5
0,25PL0,4—1,2S	"	0,4...1,2	0,25	2,4	5
0,5PL0,5—1,5S	"	0,5...1,5	0,5	2,4	10
0,5LS1—3S	"	1...3	0,5	2,4	10
EM1332	Varian	2...3	0,1	2	10
Z5360	General Electric	2,8...3,5	0,1	2	10
Z5429	" "	8,5...11	0,01	2	30

Таблица 2.7

Основные параметры мощных митронов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых'}}$ Вт	η , %	$U_{\text{атах}}$, кВ	$I_{\text{а'}}$, мА
ZM6231	General Electric	1,22...1,45	90	55	3,4	70
100S2,5—3	Mictron	2,5...3	100	60	3,6	80
BLM1341	Varian	2,6...3,05	90	—	2,9	70
500S2,9—3,1	Mictron	2,9...3,1	500	72	—	—
100S3—3,5	*	3...3,5	100	60	3,5	70
ZM6246	General Electric	4,8...5,3	75	55	3,2	70
50X8,5—9,5	Mictron	8,5...9,5	50	45	4,5	55
80X9—9,5	*	9,0...9,5	80	48	4,2	70

вых СВЧ печах [122]. Благодаря возможности непрерывного свипирования частоты удается уменьшить «холодные области» в обрабатываемом продукте. Параметры митронов приведены в табл. 2.6 и 2.7.

Перестройка частоты. Отношение максимальной частоты к минимальной у митронов составляет 1,05 ... 3. Наибольшее значение относится к митронам малой мощности. С ростом частоты и мощности диапазон перестройки сокращается. В частности, для митронов средней мощности этот коэффициент равен 2, а для мощных митронов — 1,5 и менее.

Настроечная характеристика митронов близка к линейной. Типичное отклонение реальной частотной характеристики от линейной во всем диапазоне перестройки не превышает $\pm 1\%$, а в более узком диапазоне перестройки не более $\pm 0,5\%$. Крутизна перестройки в зависимости от рабочего диапазона частот 0,2 ... 10 МГц/В. Наибольшее значение относится к митронам 3-см диапазона. Эти значения существенно меньше, чем у ЛОВ О-типа, поэтому для управления частотой митрона требуются менее мощные модуляторы.

Митроны обладают также хорошей повторяемостью настроечных характеристик, которая при правильно выбранных источниках питания оценивается разбросом в пределах $\pm 0,1\%$. Максимальная скорость перестройки митронов достигает 20 ГГц/мкс. Реализация этой скорости зависит прежде всего от возможностей и качества модуляторов напряжения.

Стабильность частоты митронов, как и других СВЧ приборов с перестройкой частоты изменением рабочего напряжения, определяется главным образом стабильностью источника питания. Создание такого источника питания для митрона проще, чем для ЛОВ О-типа, потому что крутизна перестройки митрона почти на порядок меньше. Частотная нестабильность при работе с обычным источником питания составляет 1%, а при применении стабилизированных источников она может быть уменьшена до 0,06%. При необходимости дальнейшего повышения стабильности частоты применяют схемы с обратной связью или способы синхронизации частоты от внешнего генератора.

Амплитудные шумы митронов, измеренные при смещении от рабочей частоты на 30 и 60 МГц, составляют 90 дБ/МГц (для широкодиапазонных митронов) и 100 дБ/МГц (для узкодиапазонных). Интегральные шумы в полосе частот 100 кГц ... 100 МГц примерно на 65 дБ ниже уровня колебаний на несущей частоте.

Если ранее отмечалось, что создание митронов с малыми шумами, соизмеримыми с шумами ЛОВ и отражательных клистронов, является неразрешимой задачей, то сейчас известно много промышленных типов малошумящих митронов. К ним относятся, например, митроны ZM6223 и ZM6201, выпускаемые фирмой General Electric. У первого типа митрона при $P_{\text{вых}}=1$ Вт амплитудные шумы составляют 135 дБ/Гц, у второго при $P_{\text{вых}}=1,35$ Вт — 155 дБ/Гц.

КПД. Наибольшие КПД имеют мощные митроны (45 ... 72%) (см. рис. 2.3). У отдельных лабораторных образцов $\eta=78$... 80%. Маломощные митроны характеризуются сравнительно небольшими значениями КПД, составляющими 5 ... 15%.

Прочность. Митроны благодаря малым размерам и жесткой конструкции обладают высокой механической прочностью и являются весьма устойчивыми к воздействию других эксплуатационных факторов. Они успешно выдерживают механические удары с ускорением выше 1000g, вибрацию с ускорением 20g и предельной частотой 2000 Гц. Кроме того, они устойчиво работают при $T_{\text{опр}}=-55$... $+125^{\circ}\text{C}$, при облучении нейтронами с интенсивностью $2,55 \cdot 10^8$ рад/с и гамма-лучами с интенсивностью $1,68 \cdot 10^7$ рад/с [103].

Масса. Митроны в зависимости от мощности и рабочей частоты имеют различные габаритные размеры и массу. Общий объем, занимаемый митронами, составляет 150 ... 600 см³, а их масса — 0,25 ... 3,5 кг. Значительные успехи в миниатюризации митронов достигнуты в последнее время благодаря применению магнитных сплавов с высокой магнитной энергией. Это позволило создать магнитоэкранированные митроны и довести их объем до 150 ... 200 см³.

Среди миниатюрных митронов заслуживает внимания митрон фирмы Micron. Он рассчитан на работу в диапазоне $f=0,5 \dots 1,0$ ГГц при изменении U_a в пределах 250 ... 500 В. Масса этого митрона не превышает 0,25 кг [96]. Применение миниатюрных, магнитоэкранированных и низковольтных митронов обеспечивает плотную компоновку аппаратуры и уменьшает ее общую массу. Магнитоэкранированные митроны нечувствительны к внешним магнитным полям до $30 \cdot 10^{-4}$ Тл.

Долговечность. Гарантируемый срок службы митронов зависит от выходной мощности и составляет 500 ... 1000 ч. Наименьшее значение относится к мощным митронам. Однако фактический срок службы митронов намного превышает гарантируемые значения. Как показали испытания, проведенные фирмой General Electric, фактический срок службы митронов с $P_{\text{вых}}=1 \dots 3$ Вт превышает 5 тыс. ч, а митронов с $P_{\text{вых}}=7 \dots 10$ Вт составляет 3 тыс. ч. Мощные митроны с $P_{\text{вых}} \approx 100$ Вт имеют срок службы 500 ... 1000 ч [98]. Митроны в последнее время стали применяться не только для генерации монохроматических колебаний, но и в качестве прямошумовых генераторов. Первые сообщения о создании прямошумового митрона были опубликованы фирмой

Таблица 2.8

Некоторые характеристики лабораторных образцов прямошумовых митронов

Характеристики	f , ГГц			
	1,3	3,0	3,0	5,0
Диапазон электронной перестройки, МГц	300	2000	500	1000
Ширина полосы генерации шума, МГц	До 30	150	100	—
Интегральная выходная мощность, Вт	0,25	0,25	До 2	—

Micron в 1966 г. [97]. Подобные генераторы разработаны на $f=0,2 \dots 7$ ГГц с $P_{\text{вых}}=0,25 \dots 2$ Вт [99].

Характеристики прямошумовых митронов приведены в табл. 2.8. Прямошумовые генераторы на основе митронов обладают некоторыми достоинствами. Они имеют широкий диапазон электронной перестройки частоты, в котором шумовые колебания могут перемещаться с большой скоростью. Изменением режима работы эти митроны могут переводиться в режим обычных монохроматических колебаний. По остальным эксплуатационным характеристикам (механической прочности, габаритам, массе, питающим напряжениям) они не отличаются от обычных митронов малой мощности.

В связи с развитием твердотельных СВЧ генераторов выпуск маломощных митронов ежегодно сокращается. Разрабатываются только митроны с повышенной выходной мощностью. При этом большое внимание уделяется повышению КПД, улучшению частотной стабильности, расширению диапазона электронной перестройки, сокращению габаритов и массы.

2.5. ЛОВ М-ТИПА

ЛОВМ представляют собой генераторы бегущей волны, в которых электронный пучок взаимодействует с обратной волной замедляющей системы (рис. 2.12). Достоинствами этих приборов являются наличие электронной перестройки частоты в широком диапазоне, линейность зависимости частоты от анодного напряжения, слабая зависимость частоты и мощности от изменения сопротивления нагрузки, а также присущие приборам М-типа высокие значения КПД, компактность, малая масса и способность работать в тяжелых условиях эксплуатации [9, 30].

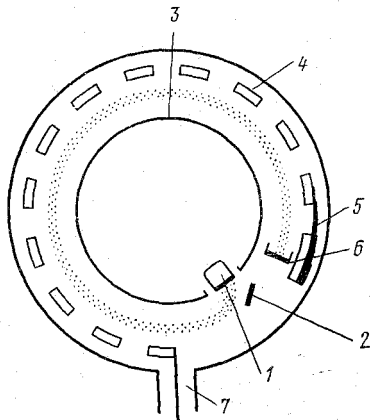


Рис. 2.12. Принцип устройства ЛОВ М-типа:

1 — катод; 2 — ускоряющий электрод; 3 — «холодный» катод; 4 — замедляющая система; 5 — поглотитель; 6 — коллектор; 7 — вывод СВЧ энергии

ЛОВМ в настоящее время применяются в бортовой, корабельной и наземной аппаратуре радиопротиводействия, в которой наиболее полно реализуются преимущества этих приборов по обеспечению быстрой электронной перестройки частоты в широких пределах при достаточно высокой выходной мощности. Однако в последние годы в связи с предпочтительным применением в этой аппаратуре мощных широкополосных усилительных приборов (усилителей М-типа, ЛБВ) интерес конструкторов аппаратуры к ЛОВМ несколько снизился. Тем не менее считается, что ЛОВМ как наиболее дешевые и простые генераторы помех будут применяться еще многие годы.

Фирмами США, Франции и Англии выпускается более 50 типов ЛОВМ с различными характеристиками. Их технический уровень характеризуется следующими данными.

Мощность и частота. ЛОВМ работают на частотах 0,5 ... 17 ГГц. В непрерывном режиме работы наибольшая $P_{\text{вых}}=750$ Вт на $f=1 \dots 10$ ГГц и около 100 Вт на $f=17,6$ ГГц (см. рис. 2.2). Известны также отдельные типы ЛОВМ с выходной мощностью, превышающей указанные значения (например, RW718 на $f=1,1 \dots 1,4$ ГГц с $P_{\text{вых}}=1$ кВт и СМА 1230 на $f=0,88 \dots 0,96$ ГГц с $P_{\text{вых}}=5$ кВт).

Перестройка частоты. Частота генерируемых колебаний ЛОВМ зависит от параметров замедляющей системы и определяется главным образом U_a . Диапазон электронной перестройки ЛОВМ достигает 10 ... 40% от средней частоты. При этом крутизна электронной перестройки составляет 0,2 ... 0,5 МГц/В.

КПД. ЛОВМ по эффективности работы несколько уступают магнетронам и усилителям М-типа. Максимальные значения КПД этих приборов достигают 50% в дециметровом диапазоне, 45% на $f=3$ ГГц, около 30% на $f=10$ ГГц и ~15% на самой крайней частоте 17,6 ГГц (см. рис. 2.3).

Масса. ЛОВМ, как и большинство приборов М-типа, имеют вместе с постоянными магнитами пакетированную конструкцию. Их масса, включая магнитную систему, составляет 3 ... 40 кг. Отношение мощности к массе приборов ~70 Вт/кг, а у лучших образцов более 100 Вт/кг.

Долговечность. Гарантируемый срок службы большинства типов зарубежных ЛОВМ составляет 250 ...

Таблица 2.9

Параметры некоторых типов мощных генераторных ЛОВМ

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, кВт	$U_{\text{аппак}}$, кВ	$I_{\text{а}}$, А	m , кг
CMA1232	Thomson—CSF	0,66...0,86	0,3	5	0,37	22
CMA1230	"	0,88...0,96	5	—	—	—
CMA1241	"	0,8...1,06	0,9	6	0,6	14
RW718	Warnecke E. T.	1,1...1,4	1,0	7	1,2	—
L3721	Litton	1,1...1,4	0,2	5,2	0,5	12
L3/24A	"	2,5...3,55	0,23	5,2	0,35	7,3
CMA1247	Thomson—CSF	3,2...4,1	0,5	—	—	3,5
BWX5	M—O Valvo	7,5...10,4	0,1	5	0,37	9,1
CMA1290	Thomson—CSF	15,4...17,7	0,1	4,2	0,3	3,7

500 ч. Фактический срок службы этих приборов значительно превышает указанные значения. Известно, например, что ЛОВМ с синхронизацией внешним сигналом проработала в станции космической связи более 20 тыс. ч [112]. Технические характеристики отдельных промышленных типов ЛОВМ приведены в табл. 2.9.

В последнее время отдельными зарубежными фирмами изучается возможность повышения стабильности частоты ЛОВМ путем использования этих приборов в режиме синхронизации частоты от внешнего СВЧ источника. На этой основе созданы специальные приборы, получившие название карпитронов. Фирмой Thomson—CSF, например, разработаны образцы карпитронов на частоты 6, 10 и 12 ГГц, предназначенные для использования в выходных каскадах наземных станций спутниковых систем связи и спутниковых передатчиков, осуществляющих прямую трансляцию телевизионных программ [122].

В одной из наземных станций длительное время используется карпитрон, работающий на $f=6$ ГГц с $P_{\text{вых}}=500$ Вт при плотности тока катода $j_k=1,5$ А/см². Как показали результаты эксплуатации, средний срок службы этого карпитрона превышает 25 тыс. ч. На основе этого прибора с использованием методов машинного проектирования был создан экспериментальный образец карпитрона на частоту ~ 10 ГГц с $P_{\text{вых}}=1$ кВт и электронным КПД=47%. При $P_{\text{вх}}=12,5$ Вт полоса синхронизации этого карпитрона составляла 40 ... 50 МГц.

В результате исследований, проведенных в последнее время фирмой Thomson—CSF, создана опытная модель

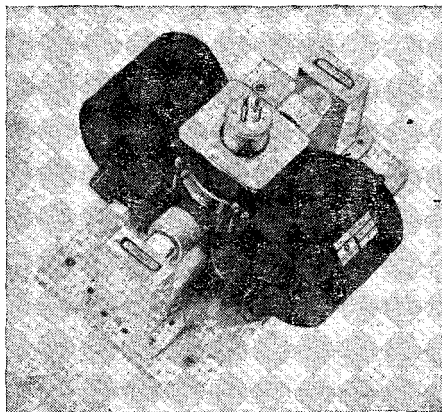


Рис. 2.13. ЛОВМ типа СМР1115 с синхронизацией частоты

карпитрона на $f=11 \dots 12$ ГГц. Эта модель имеет $P_{\text{вых}}=540$ Вт в непрерывном режиме и электронный КПД=38%. Однако, по мнению специалистов этой фирмы, созданные образцы карпитронов еще не в полной мере отвечают предъявляемым требованиям, особенно при их использовании в бортовой спутниковой аппаратуре. Для успешного завершения этих работ требуется решить ряд сложных задач, в том числе по уменьшению температурного дрейфа частоты при включении, по созданию регулируемых источников питания для осуществления электронной перестройки частоты, уменьшению уходов частоты при изменении тока катода и напряжения [122].

Внешний вид одного из карпитронов показан на рис. 2.13. Карпитрон типа СМР1115 на $f=5,925 \dots 6,425$ ГГц с $P_{\text{вых}}=500$ Вт в непрерывном режиме выпускается фирмой Thomson—CSF. Он имеет пакетированную конструкцию с постоянными магнитами, жидкостное охлаждение и волноводные выводы СВЧ энергии. К входному выводу подводятся СВЧ колебания от внешнего стабилизированного источника. Общая масса карпитрона 5,7 кг.

2.6. УСИЛИТЕЛИ МАГНЕТРОННОГО ТИПА

Усилители М-типа занимают важное место среди СВЧ приборов магнетронного типа. Они используются

для усиления СВЧ колебаний в импульсном и непрерывном режимах, а также при работе в комбинированном импульсно-непрерывном режиме.

Эти усилители различаются по конструкции источника электронов (с эмитирующим отрицательным электродом и с инжектированным электронным потоком), по характеру взаимодействия электронов с СВЧ полем (с прямой, обратной и поперечной волнами), виду электронного потока (с замкнутым и разомкнутым потоками), конструкции замедляющей системы (с пространством дрейфа и без него) и способу модуляции (с катодной модуляцией и с безмодуляционным питанием) [9, 29].

Среди них наиболее распространенными являются приборы с эмитирующим отрицательным электродом и замкнутым электронным потоком, работающие на обратной волне (амплитроны), и приборы с замкнутым электронным потоком и пространством дрейфа (рис. 2.14). Приборы с инжектированным электронным потоком с прямой (ЛБВМ и биматроны) и обратной (ЛОВМ) волнами, а также с незамкнутым электронным потоком и прямой волной (дематроны) распространены меньше.

Основными достоинствами усилителей М-типа являются высокие КПД и меньшие по сравнению с аналогичными по мощности усилительными клистродами и ЛБВО рабочие напряжения, габаритные размеры и масса. Благодаря высокому КПД и низкому рабочему напряжению модуляторы, используемые для питания в импульсном режиме, оказываются более компактными и легкими. При использовании усилителей М-типа с безмодуляционным питанием достигается значительное уменьшение габаритных размеров, массы и повышение общего КПД передающих устройств.

Усилители М-типа применяются в радиолокационных станциях различного назначения, системах радиопроводействия, телеметрических передатчиках, системах связи, в том числе через искусственные спутники Земли, в ускорителях элементарных частиц и установках СВЧ нагрева. В последнее время обсуждается вопрос о применении усилителей М-типа в разрабатываемых проектах космических систем преобразования солнечной энергии в энергию СВЧ с последующей передачей ее на Землю [120, 121].

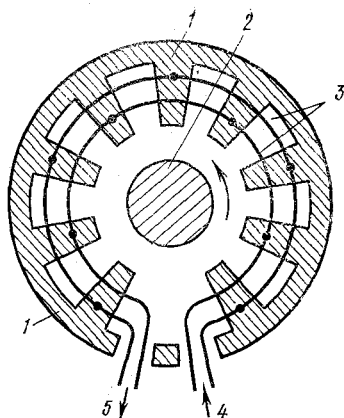


Рис. 2.14. Принцип устройства усилительного магнетрона-амплитрона:

1 — анодный блок; 2 — цилиндрический катод; 3 — связи; 4 и 5 — ввод и вывод СВЧ энергии

Вместе с тем имеющимся усилителям М-типа свойственны и некоторые недостатки, в том числе склонность к самовозбуждению, низкий коэффициент усиления, сравнительно узкая полоса пропускания, большие внутриимпульсные шумы и повышенная частота пробоев. Эти недостатки в ряде случаев являются серьезным препятствием к использованию указанных приборов в радиоэлектронной аппаратуре [117].

В настоящее время за рубежом выпускается около 120 типов усилителей М-типа, предназначенных преимущественно для работы в импульсных режимах. Технический уровень этих усилителей характеризуется следующими данными [71].

Частота и мощность. Рабочие частоты импульсных усилителей М-типа 0,4 ... 17 ГГц. Максимальная выходная мощность в импульсном режиме составляет 10 МВт на частотах до 1 ГГц, 3 МВт на $f=3 \dots 6$ ГГц, 1 МВт на $f \approx 10$ ГГц и 100 кВт на частоте 17 ГГц (см. рис. 2.1). Усилители М-типа непрерывного режима работают на $f=0,54 \dots 17,5$ ГГц. Максимальная выходная мощность этих приборов на частотах 0,915 и 2,45 ГГц существенно превышает 100 кВт.

Самыми мощными среди усилителей М-типа как в импульсном, так и в непрерывном режимах являются амплитроны. Примеры наиболее мощных усилителей М-типа, работающих в импульсном режиме, приведены

Таблица 2.10

Основные параметры мощных импульсных усилителей М-типа

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{н}}$, кВт	K_3	$K_{y'}$, дБ	$U_{a'}$, кВ	$I_{a'}$, А	m , кг
SFD225	Varian	0,40...0,45	250	0,02	10	15	30	100
QKS576	Raytheon	0,57...0,63	10 000	0,007	8	80	200	—
RK7577	"	1,28...1,35	5300	0,007	11	105	98	55
TH4011	Thomson—CSF	2,9...3,1	60	0,02	14	8	20	—
SFD238	Varian	3,1...3,5	125	0,08	12	15	20	18
SFD254	"	3,1...3,5	500	0,01	14	28	40	29
L5408	Litton	5,3...5,9	500	0,02	13	22	750	38
SFD222	Varian	5,4...5,9	1000	0,014	17	40	60	26
SFD252	"	5,4...5,9	2000	0,01	13	35	120	—
SFD242	"	9,0...9,6	1000	0,0025	14	40	60	17
QKS1705	Raytheon	9,5...10,0	500	0,001	12	34	45	12,5
SFD236	Varian	16...17	100	0,0012	17	16	27	6,8

в табл. 2.10. Как видно из этой таблицы, самым мощным является амплитрон типа QKS576 фирмы Raytheon на $f=0,6$ ГГц с $P_{\text{и}}=10$ МВт при $P_{\text{ср}}=72$ кВт. По мнению специалистов фирмы Varian, достигнутый уровень импульсной мощности не может считаться предельным. Использование в мощных усилителях М-типа вторично-эмиссионных холодных катодов из платины позволяет рассчитывать на повышение уровня импульсной мощности по крайней мере до 20 МВт в дециметровом диапазоне.

По достигнутой средней мощности усилители М-типа несколько уступают приборам О-типа. Максимальное значение средней мощности, полученное на амплитроне QKS1493 дециметрового диапазона, составляет 156 кВт. Проводимые в последнее время исследования по изучению тепловых нагрузок замедляющих систем и изысканию наиболее оптимальных условий их работы, а также применение тугоплавких металлов для изготовления замедляющих систем и «холодных» катодов с повышенной вторичной эмиссией могут привести к дальнейшему увеличению выходной мощности этих приборов.

Длительность импульса. Усилители М-типа способны работать в импульсных режимах при различной длительности импульсов от 30 нс до 250 мкс [113]. Допустимая максимальная длительность импульсов (τ) зависит от размеров поверхности замедляющей системы и ее термической прочности. Поэтому усилители дециметрового диапазона могут устойчиво работать при τ до 200 ... 250 мкс, а усилители на $f=16$... 17 ГГц — только до 3 мкс. Примерами усилителей М-типа, обеспечивающих работу при максимальных длительностях импульсов, могут служить амплитроны фирмы Raytheon типов QKS1319 и QKS1606 [70].

Амплитроны QKS1319 на $f=1,25$... 1,35 ГГц и $P_{\text{и}}=3$ кВт при $K_{\text{э}}=0,03$ позволяют работать при $\tau \leq 250$ мкс. Другой амплитрон QKS1606 на $f=3,1$... 3,5 ГГц и $P_{\text{и}}=750$ кВт при $K_{\text{э}}=0,06$ может работать при $\tau=200$ мкс. Специалисты фирмы Varian, рекламируя усилители М-типа с $\tau \approx 30$... 40 нс, считают возможным обеспечить работу усилителей этого типа при более коротких импульсах [74].

Усиление. Рекламируемые усилители М-типа в зависимости от их конструктивных особенностей, выходной мощности и КПД имеют $K_{\text{у}}=7$... 20 дБ [71]. Наимень-

шие значения относятся к мощным усилителям с замкнутым лучом, для которых достижение высокого КПД является важнейшим требованием.

Усилители с инжектированным лучом и небольшой выходной мощностью имеют $K_y = 17 \dots 20$ дБ. Такое усиление чаще всего достигается за счет сокращения полосы пропускания и снижения КПД. Примерами усилителей М-типа с усилением ~ 20 дБ являются приборы с инжектированным лучом RW619, RW618 и RW620, выпускаемые фирмой Warnecke [70].

Усилители с небольшим коэффициентом усиления обладают некоторыми преимуществами: имеют меньшую фазовую чувствительность, меньший уровень паразитной генерации и большую линейность фазочастотной характеристики. Например, фазовая чувствительность амплитронов составляет 2° на один процент изменения напряжения, а усилителей с большим усилением — до 5° . Поэтому для поддержания одинаковой фазовой стабильности у приборов с большим усилением требуется более высокая степень стабильности напряжения модулятора.

Аналогичное положение наблюдается также с обеспечением линейности фазочастотной характеристики усилителей. Например, для усилителя с $K_y = 14$ дБ, внутренними потерями 1,5 дБ при КСВ возбуждателя и нагрузке 1,5 отклонение фазочастотной характеристики от линейной зависимости составляет 9° , а для усилителя, работающего в таких же условиях, но имеющего усиление 17 дБ, — 14° [113].

Полоса. Импульсные усилители М-типа имеют полосу пропускания в пределах от нескольких процентов до октавы. Наиболее широкополосными являются усилители прямой волны с инжектированным лучом. Максимальная ширина полосы пропускания этих усилителей достигает октавы (67%). Примерами наиболее широкополосных приборов могут служить усилители RW619 и RW620, выпускаемые фирмой Warnecke. Они при $P_n = 8 \dots 10$ кВт и подстройке анодного напряжения работают в полосе частот $2 \dots 4$ и $4 \dots 8$ ГГц соответственно (см. табл. 2.11).

Усилители обратной волны имеют существенно меньшие значения полосы пропускания, которые у лучших типов приборов находятся в пределах $6 \dots 13\%$ [118].

КПД. Усилители М-типа обладают очень высокой

Таблица 2.11

Основные параметры усилителей М-типа
импульсно-непрерывного режима

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	m , кг	K_3	$P_{\text{вых}}$, кВт	$K_{\text{у}}$, дБ	$U_{\text{а}}$, кВ	η , %
RW619	Warnecke	2...4	7,7	0,1	10	20	9	35
				0,33	3	20	7,5	30
				1	1	17	5,5	30
SFD605	Varian	2,5...3,1	5,9	0,2	5	17	5	40
				1	1	10	4,2	35
RW617	Warnecke	2,6...3,2	7,7	0,1	6	20	7,8	35
				0,33	3	20	6,5	30
				1	1	20	5,7	25
RW618	"	4,6...5,4	7,7	0,1	5	20	7,5	30
				0,3	2,5	20	6,7	27
				1	0,8	20	5,3	22
RW620	"	4...8	7,7	0,1	8	20	9,5	30
				0,3	2,5	20	7,5	25
				1	1	17	6,5	20

эффективностью работы, и это является их основным достоинством. Эти приборы по максимально достигнутому значению КПД превосходят все виды мощных приборов СВЧ. Самый высокий КПД имеют усилители обратной волны с распределенной эмиссией и замкнутым электронным лучом с обратной связью. Их КПД в дециметровом диапазоне частот достигает 90%, а на $f=3$ ГГц — 80% и на $f=10$ ГГц — 53% (см. рис. 2.3). У амплитронов QKS1220 фирмы Raytheon $\eta=90\%$ на частоте 0,485 ГГц [102].

Меньшие значения КПД (50 ... 30%) в диапазоне частот 3 ... 18 ГГц имеют усилители с замкнутым лучом и пространством дрейфа. Среди них наиболее высокий КПД (50%) имеют усилители SFD243 фирмы Varian на $f=3,1$... 3,5 ГГц с $P_{\text{н}}=125$ кВт при $K_3=0,008$, $U_{\text{а}}=14$ кВ и $I_{\text{а}}=21$ А. Усиление этого прибора 11,5 дБ. Масса 18 кг. КПД усилителей с незамкнутым лучом находится в пределах 25 ... 40%.

Шумы. Шумовые свойства усилителей М-типа характеризуются паразитной генерацией, между- и внутриимпульсными шумами. Уровень паразитной генерации этих усилителей, по оценкам специалистов фирм Varian и Raytheon, в полосе частот 1 ... 6 МГц на 30 ... 40 дБ

ниже уровня колебаний на несущей частоте. Минимальное значение междуимпульсных шумов приближается к тепловым и составляет 115 дБ·мВт/МГц.

Внутриимпульсные шумы усилителей М-типа в диапазоне частот 1 ... 6 ГГц при $P_{\text{н}}=100 \dots 750$ кВт, по данным фирмы Raytheon, находятся в пределах 32 ... 58 дБ/МГц. Фирма Varian сообщает, что выпускаемые ею усилители с пространством дрейфа имеют отношение сигнал — шум 45 ... 60 дБ/МГц [108].

Стабильность импульсов. Усилители М-типа имеют более высокую стабильность импульсов, чем магнетроны. Она определяется в основном стабильностью сигналов источника возбуждения и напряжения модулятора. Пропуски импульсов наблюдаются только в случае пропуска импульсов в сигнале возбуждения или вследствие искрений.

Габариты и масса. Компактность и малая масса усилителей М-типа являются отличительной особенностью приборов со скрещенными полями. Это объясняется значительно меньшим, чем у приборов О-типа, пространством взаимодействия, а также наиболее рациональной цилиндрической формой этих приборов. Масса усилителей М-типа в зависимости от рабочего диапазона частот и $P_{\text{н}}$ составляет 4 ... 100 кг. Наибольшие значения относятся к приборам дециметрового диапазона, а наименьшие — к приборам коротковолновой части сантиметрового диапазона (см. табл. 2.10).

Изменение массы приборов в зависимости от $P_{\text{н}}$ можно показать на примерах усилителей, работающих на частотах 3 и 9 ГГц [70]. Для усилителей с номинальной частотой 3 ГГц при $P_{\text{н}}=10$ кВт (SFD246) $m=5,5$ кг, а при $P_{\text{н}}=500$ кВт (SFD254) — 29 кг. Для усилителей с номинальной частотой 9 ГГц при $P_{\text{н}}=5$ кВт (QKS1244) их $m=3,85$ кг, а при $P_{\text{н}}=500$ кВт (QKS1705) — 12,5 кг.

Преимущества усилителей М-типа по этим показателям по сравнению с другими приборами, например с ЛБВ импульсного режима, становятся еще более значительными, если учесть габариты и массу применяемых модуляторов. Большой КПД и меньшее рабочее напряжение усилителей М-типа по сравнению с ЛБВ при одинаковой выходной мощности позволяют снизить массу модулятора в 2 ... 3 раза.

Долговечность. Средний срок службы усилителей М-типа в зависимости от рабочего диапазона частот составляет 1 ... 10 тыс. ч. Наименьшие значения относятся к усилителям коротковолновой части сантиметрового диапазона, а наибольшие — к усилителям дециметрового диапазона [113].

Наиболее высокую надежность и большую долговечность имеют усилители с безмодуляторным питанием. Это достигается в результате применения более простых источников питания и «холодных» платиновых катодов. Усилители с вторично-эмиссионными катодами из платины обладают повышенной устойчивостью к воздействию остаточных газов и обратной бомбардировки ионами. Прогнозируемый срок службы этих приборов ~10 тыс. ч. Применение платины несмотря на ее дороговизну, по мнению зарубежных специалистов, является экономически оправданным, тем более, что она расходуется в небольших количествах только для покрытия поверхности «холодных» катодов.

Усилители М-типа, так же как магнетронные генераторы, имеют пакетированную конструкцию и преимущественно волноводные выводы СВЧ энергии. Исключение составляют только отдельные типы усилителей дециметрового диапазона, в которых применяются выводы коаксиального типа. Примеры конструктивного выполнения

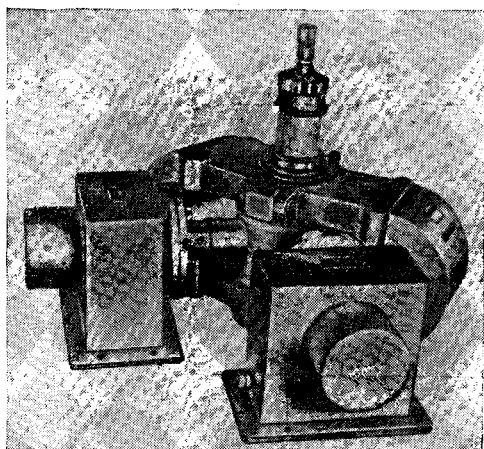


Рис. 2.15. Амплитрон типа QKS653

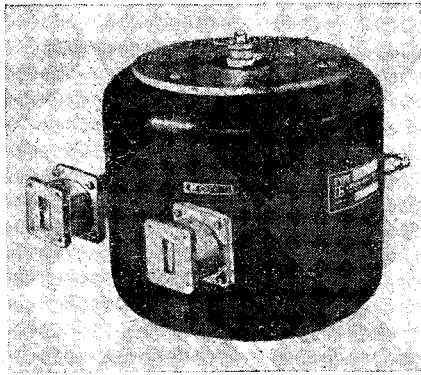


Рис. 2.16. ЛБВМ типа L5334

усилителей М-типа показаны на рис. 2.15 и 2.16. Ампли-
трон типа QKS653, выпускаемый фирмой Raytheon,
является одним из наиболее мощных импульсных ампли-
тронов на $f=1,25 \dots 1,35$ ГГц. Его $P_{и}=5,3$ МВт, а масса
вместе с волноводными выводами СВЧ энергии 54,5 кг.
ЛБВМ типа L5334 выпускается фирмой Litton. Лампа
расположена в тороидальном постоянном магните, имеет
волноводные выводы СВЧ энергии. Масса ее составляет
12,7 кг. В диапазоне частот 8,5 ... 9,6 ГГц у нее $P_{и}=$
 $=500$ кВт.

Фирмами Warnecke, Varian/Eastern Tube и Litton
разрабатываются и выпускаются двухрежимные усили-
тели М-типа, обеспечивающие работу в импульсном и
непрерывном режимах. Эти приборы, так же как двух-
режимные ЛБВ, используются в аппаратуре радиопро-
тиводействия для создания маскировочных (импульсный
режим) и заградительных (режим непрерывных колеба-
ний) помех. В отличие от двухрежимных ЛБВ усили-
тели М-типа имеют наибольшее отношение уровней мощ-
ности в импульсном и непрерывном режимах, а также
меньшие изменения усиления и КПД при переходе с од-
ного режима на другой.

В усилителях М-типа усиление и КПД поддержива-
ются примерно постоянными путем одновременного измене-
ния магнитного поля и приложенного напряжения. Время для переключения магнитного поля не превышает
10 ... 20 мкс [101]. Однако усилители М-типа уступают
двухрежимным ЛБВ по мгновенной полосе пропускания,

что является некоторым препятствием для их широкого применения в аппаратуре радиопротиводействия [109].

Типовые значения параметров двухрежимных, а точнее многорежимных, усилителей М-типа приведены в табл. 2.11. Эти данные достаточно полно характеризуют технический уровень приборов, рекламируемых в настоящее время [71]. Как видно из таблицы, эти усилители могут использоваться в двух-трех режимах работы, обеспечивая большую выходную мощность в непрерывном и импульсном режимах. У этих приборов $K_y=17 \dots 20$ дБ и мало меняется при переходе из импульсного в режим непрерывных колебаний. КПД многорежимных усилителей М-типа значительно меньше, чем у обычных однорежимных усилителей этого типа, но он несколько выше значений, полученных на двухрежимных ЛБВ. Масса и габаритные размеры этих усилителей позволяют использовать их на борту летательных аппаратов.

Указанные выше зарубежные фирмы продолжают работы по дальнейшему совершенствованию усилителей М-типа и прежде всего в направлениях расширения полосы пропускания, повышения средней мощности и усиления, увеличения длительности импульсов, улучшения и упрощения способов модуляции и повышения долговечности. В этом отношении представляют интерес достижения специалистов фирмы Raytheon в создании мощного широкополосного усилителя с большой средней мощностью [105]. В результате использования новой замедляющей системы, «холодного» платинового катода и жидкостного охлаждения этой фирме удалось создать усилитель обратной волны типа QKS1606 с $P_{ср}=45$ кВт в диапазоне частот 3,1 ... 3,5 ГГц. Усилитель имеет $P_n=750$ кВт при $\tau=200$ мкс, K_y не менее 10 дБ в полосе 12% и КПД до 70% [70]. Ожидаемый средний срок службы усилителя QKS1606 более 10 тыс. ч [105].

Обнадеживающие результаты по увеличению долговечности усилителей М-типа получены фирмами Varian/Eastern Tube и Raytheon на основе совершенствования «холодных» катодов. Как сообщается в работе [108], «холодный» катод из окиси бериллия может обеспечить работу усилителя среднего уровня мощности в течение 10 тыс. ч. Применение «холодных» катодов на основе чистых металлов позволяет рассчитывать на до-

стижение среднего срока службы усилителей М-типа более 100 тыс. ч.

Благодаря своей высокой эффективности усилители М-типа кроме применения в аппаратуре радиолокации и радиопротиводействия могут в ближайшее время получить применение в аппаратуре спутниковой связи и в космических системах преобразования солнечной энергии и передачи ее на Землю [114, 115].

Глава 3

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Лампы бегущей волны (ЛБВ) составляют наиболее многочисленный и быстро развивающийся класс электровакуумных приборов СВЧ. К настоящему времени зарубежными фирмами разработано более 1700 типов ЛБВ различного функционального назначения и конструктивного оформления [42, 71]. Быстрое развитие и широкое применение этих приборов в различной радиоэлектронной аппаратуре объясняется тем, что они обладают целым рядом достоинств по сравнению с другими приборами СВЧ диапазона: высокое значение коэффициента усиления, широкополосность, возможность работы в импульсном и непрерывном режимах в широком интервале выходных мощностей, низкий уровень собственных шумов [6, 10, 33].

Благодаря распределенному по длине замедляющей системы взаимодействию электронного пучка с электромагнитным полем бегущей волны в приборах этого типа достигается значительное усиление при сравнительно небольшом токе пучка. Коэффициенты усиления ЛБВ при необходимости могут достигать 60 дБ и более [77]. Применение замедляющих систем со слабо выраженными резонансными свойствами обеспечивает усиление сигналов в очень широкой полосе частот, достигающей двух и более октав. ЛБВ создаются для работы как в импульсном, так и в непрерывном режимах, а также для поочередной работы в обоих режимах. Используемый в ЛБВ принцип работы позволяет создавать входные усилители с очень малым коэффициентом шума при большом усилении, а также миниатюрные усилители ма-

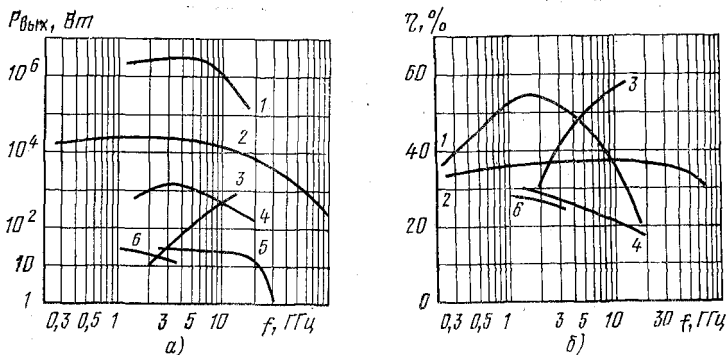


Рис. 3.1. Максимальные значения выходной мощности (а) и КПД (б) различных ЛБВ:

1 — импульсного режима; 2 — непрерывного режима; 3 — ЛБВ для космической аппаратуры; 4 — двухрежимные (в импульсном режиме); 5 — печатные ЛБВ; 6 — мини-ЛБВ

лой и средней мощности, которые имеют такие же малые размеры и массу, как и твердотельные СВЧ приборы с аналогичными уровнями выходной мощности.

ЛБВ по конструкции и функциональному назначению подразделяются на мощные и маломощные импульсного режима, мощные непрерывного режима, двухрежимные (импульсно-непрерывного режима), средней мощности, маломощные и малозумящие. Среди приборов средней мощности специально выделяются и заслуживают особого внимания ЛБВ для аппаратуры

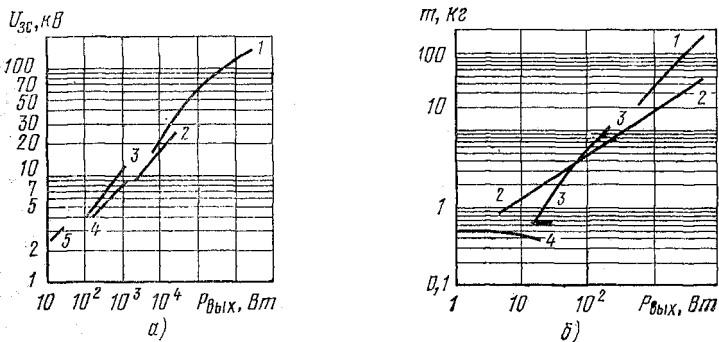


Рис. 3.2. Зависимости напряжения замедляющей системы (а) и массы (б) от выходной мощности ЛБВ:

1 — импульсного режима; 2 — непрерывного режима; 3 — для космической аппаратуры; 4 — мини-ЛБВ; 5 — двухрежимные

космической связи и телевидения, миниатюрные ЛБВ (мини-ЛБВ) для активных фазированных решеток (ФАР) и бортовых систем радиопротиводействия, а также ЛБВ на печатных платах [42]. Указанные приборы применяются в широкодиапазонных наземных и бортовых радиолокационных станциях, аппаратуре радиорелейной и спутниковой связи, средствах радиотехнической разведки и радиопротиводействия.

С помощью ЛБВ достигнуты значительные выходные мощности как в импульсном, так и в непрерывном режимах работы. На рис. 3.1,а показаны наибольшие выходные мощности, достигнутые в различных типах ЛБВ. Наибольшая мощность в импульсном режиме составляет 4 МВт на $f=1 \dots 6$ ГГц, ~ 1 МВт на $f=10$ ГГц и ~ 200 кВт на $f=18$ ГГц. В непрерывном режиме $P_{\text{вых max}}=20$ кВт на $f=0,2 \dots 10$ ГГц, 5 кВт на частоте 30 ГГц и 300 Вт на $f \approx 90$ ГГц. Двухрежимные ЛБВ в импульсном режиме имеют $P_{\text{вых}} > 1$ кВт на $f=3 \dots 5$ ГГц. Мощность ЛБВ для космической связи достигает 800 Вт на $f \approx 12$ ГГц.

По КПД ЛБВ несколько уступают усилителям М-типа. У ЛБВ импульсного режима $\eta_{\text{max}}=55\%$ на $f \sim 1,5$ ГГц. Среди приборов непрерывного режима работы наибольший КПД (до 58%) получен у ЛБВ, предназначенных для аппаратуры космической связи и телевидения (рис. 3.1,б).

ЛБВ в зависимости от выходной мощности работают при напряжении замедляющей системы $U_{\text{ac}}=115$ В ...

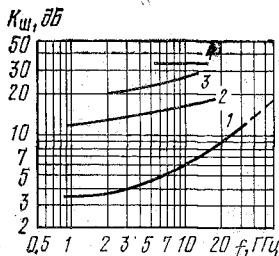


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента шума от частоты и выходной мощности ЛБВ:

1 — сверхмаломощные; 2 — маломощные (1...3 Вт); 3 — для космической аппаратуры; 4 — средней мощности

... 150 кВ (рис. 3.2,а). Наибольшие значения напряжения имеют мощные импульсные ЛБВ, а наименьшие — маломощные и малозумящие ЛБВ. Общая масса ЛБВ вместе с фокусирующими устройствами в виде соленоида или периодической системы из постоянных магнитов в зависимости от выходной мощности находится в пределах 0,4 ... 150 кг (рис. 3.2,б). Самыми легкими являются мини-ЛБВ с $P_{\text{вых}} \approx 20$ Вт, отдельные типы которых имеют $m < 100$ г. К наиболее громоздким и тяжелым приборам отно-

ются мощные импульсные ЛБВ дециметрового диапазона.

ЛБВ характеризуются низким уровнем собственных шумов. На рис. 3.3 приведены графики минимальных значений коэффициента шума ЛБВ различного функционального назначения. Самый низкий уровень шумов имеют сверхмалозумящие усилительные ЛБВ, у которых коэффициент шума $K_{ш}=3,5$ дБ на частоте ~ 1 ГГц, 4 дБ на $f=3$ ГГц, 6 дБ на $f=10$ ГГц и 9 дБ на $f=20$ ГГц. У ЛБВ мощностью 1 ... 3 Вт на $f=1$... 18 ГГц $K_{ш\text{ min}}=11$... 18 дБ.

Номенклатура ЛБВ, выпускаемых зарубежными фирмами, продолжает претерпевать качественные изменения. При этом ежегодно увеличивается число типов мощных ЛБВ импульсного и непрерывного режимов, которое в настоящее время составляет более 30% от общей номенклатуры. С ростом производства твердотельных СВЧ усилителей заметно сокращается число типов малозумящих и маломощных ЛБВ, доля которых снизилась до 27%. Продолжается обновление номенклатуры ЛБВ средней мощности в результате создания малогабаритных и широкополосных ЛБВ для РЛС с ФАР, средств космической связи.

3.1. ИМПУЛЬСНЫЕ ЛБВ

Так как в последнее время передающие устройства многих радиоэлектронных систем СВЧ диапазона создаются на основе применения усилительных цепочек, большой интерес конструкторы этих систем проявляют к мощным импульсным усилительным ЛБВ. Эти приборы по совокупности важнейших параметров, включая полосу пропускания, коэффициент усиления, среднюю мощность и КПД, прочность и компактность конструкции, превосходят другие виды усилительных СВЧ приборов [132]. Благодаря этому они получили широкое применение в стационарных и подвижных системах радиолокационного обнаружения и наведения, в бортовых устройствах управления огнем, системах радиопротиводействия, в космических и наземных системах связи и во многих других видах аппаратуры [55, 64]. В настоящее время зарубежными фирмами рекламируется более 220 типов импульсных ЛБВ, которые по выходной мощности условно можно разделить на ЛБВ большой мощ-

Таблица 3.1

Основные параметры наиболее мощных импульсных ЛБВ

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{к}}$, кВт	K_{α}	K_{γ} , дБ	$U_{\text{вс}}$, кВ	m , кг
QKW1701	Raytheon	1,2...1,4	300	0,033	50	48	91
560H	Hughes	3,1...3,5	250	0,02	53	48	68
PT1020	EMI—Varian	5,35...5,85	4000	0,0015	33	135	240 ¹⁾
635H	Hughes	5,40...5,85	200	0,04	48	50	25
N1061	Englich Electric V.	7,7...8,3	900	0,005	33	100	145
739H	Hughes	8,4...9,2	200	0,005	12	48	5,4
752H	"	8,4...9,4	100	0,01	16	50	13,5
835H	"	15,9...16,4	185	0,01	48	85	13,5

¹⁾ С фокусирующим соленоидом.

ности (>10 кВт) и ЛБВ средней и малой мощности (<10 кВт).

Технический уровень этих приборов целесообразно рассмотреть раздельно. Мощные импульсные ЛБВ характеризуются следующими данными.

Частота и мощность. Импульсные ЛБВ большой мощности созданы на $f=0,4 \dots 17$ ГГц и имеют $P_{\text{к}}=10$ кВт \dots 4 МВт. Среди приборов с предельными рабочими частотами целесообразно отметить ЛБВ QKW 1630 фирмы Raytheon и 861H фирмы Hughes [70, 71]. ЛБВ QKW1630 является наиболее длинноволновой и обеспечивает на $f=0,4 \dots 0,5$ ГГц при $K_{\gamma}=40$ дБ и $U_{\text{вс}}=41$ кВ выходную мощность в импульсе 16 кВт. Общая масса этого прибора 160 кг. ЛБВ 861H относится к числу наиболее коротковолновых. Она работает на $f=16,5 \dots 17,0$ ГГц и обеспечивает $P_{\text{к}}=13,5$ кВт при коэффициенте заполнения 0,025, $K_{\gamma}=47$ дБ и $U_{\text{вс}}=30$ кВ. Масса этой ЛБВ составляет всего 5,2 кг.

Параметры отдельных типов мощных ЛБВ приведены в табл. 3.1. Как видно из таблицы, самой мощной является ЛБВ типа PT1020 [70]. В последние годы приборы СВЧ с высокой импульсной мощностью создаются на основе соединения в одном корпусе элементов пролетного клистрона и мощной широкополосной ЛБВ. Эти приборы получили название твистронов (см. гл. 6). Импульсная мощность большинства типов мощных ЛБВ не превышает 300 кВт.

Полоса. Важнейшим преимуществом мощных импульсных ЛБВ перед другими усилительными СВЧ приборами является их способность работать в широкой полосе частот. Рабочая полоса частот этих приборов в зависимости от импульсной мощности и частоты находится в пределах 8 ... 25%. При этом наибольшие значения относятся к ЛБВ дециметрового диапазона с $P_{и} \leq 50$ кВт, а наименьшие — к ЛБВ сантиметрового диапазона с $P_{и} \geq 300$ кВт.

Вместе с тем ряд мощных ЛБВ имеют полосу пропускания, превышающую указанные типовые значения [70]. Например, ЛБВ типа VA131 фирмы Varian на $f=1,15 \dots 1,55$ ГГц с $P_{и}=50$ кВт имеет полосу пропускания $\sim 30\%$. Другая ЛБВ типа TOP1304 фирмы Thomson-CSF на $f=2,85 \dots 3,15$ ГГц с $P_{и}=160$ кВт и $K_{у}=31$ дБ имеет полосу пропускания 14%.

Усиление. Мощные импульсные ЛБВ по коэффициенту усиления (35 ... 60 дБ) значительно превосходят усилители М-типа. Наибольшее число типов приборов имеет $K_{у}=40 \dots 50$ дБ. Среди мощных ЛБВ с большим усилением можно отметить, в частности, ЛБВ 835H фирмы Hughes. Она на $f=16 \dots 16,5$ ГГц при $P_{и}=200$ кВт имеет $K_{у}=60$ дБ [70].

Последние годы в связи с применением ЛБВ в передающих устройствах РЛС и в аппаратуре радиопротиводействия большое внимание уделяется созданию этих приборов с низковольтным управлением электронным лучом. До сравнительно недавнего времени управление электронным лучом в ЛБВ осуществлялось подведением модулирующего напряжения к первому аноду или к специальному управляющему электроду. В первом случае для управления требуется небольшая мощность, поскольку модулирующий анод можно изготовить с минимальным оседанием электронов, но при этом требуется очень высокое модулирующее напряжение. В случае применения для управления электронным лучом дополнительного электрода — сетки требуется небольшое напряжение, но в связи с большим оседанием электронов на сетку (до 10 ... 20% от общего тока) применение этого способа в мощных ЛБВ ограничивается недостаточной термической стойкостью сеток.

Разработаны электронные пушки без перехвата электронов, предназначенные для управления мощными электронными лучами. В этой пушке используются две

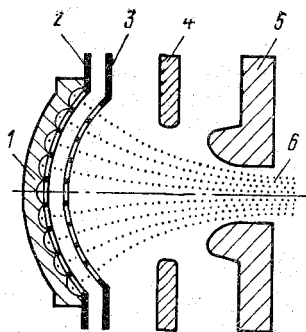


Рис. 3.4. Устройство электронно-оптической системы ЛБВ с теневой и управляющей сетками:

1 — катод; 2 — теневая сетка; 3 — управляющая сетка; 4 — фокусирующий электрод; 5 — анод; 6 — траектории электронов

близко расположенные соосные сетки. Одна (теневая сетка) находится около катода и имеет потенциал катода, вторая (управляющая сетка) расположена на некотором расстоянии от теневой сетки и имеет положительный потенциал. Теневая сетка подавляет эмиссию электронов с тех частей катода, которые расположены под управляющей сеткой [44, 45]. Устройство электронной пушки с теневой и управляющей сетками схематически показано на рис. 3.4. Применение теневой сетки позволяет снизить токоперехват управляющей сеткой

с 10 ... 20 до 0,1%. При этом усиление в таких пушках остается достаточно высоким, хотя и несколько уменьшается по сравнению с электронными пушками с одинарными сетками.

В настоящее время зарубежными фирмами создано много типов мощных импульсных ЛБВ с сеточным низковольтным управлением. Для примера можно привести ЛБВ 786Н и 796Н фирмы Hughes [148]. В ЛБВ 786Н используются электронная пушка с теневой сеткой без перехвата электронов и встроенный соленоид для фокусировки электронного луча. Эта лампа на $f=9,3 \dots 9,9$ ГГц имеет $P_{\text{и}}=50$ кВт при $K_{\text{э}}=0,12$, $U_{\text{зс}}=35$ кВ и жидкостном охлаждении. В полосе пропускания 7,5% $K_{\text{у}}=54$ дБ. Общая масса лампы ~20 кг.

В ЛБВ 796Н на $f=9,2 \dots 9,9$ ГГц с $P_{\text{и}}=40$ кВт и $P_{\text{ср}}=2$ кВт также используется электронная пушка с теневой сеткой. В отличие от ЛБВ 786Н в ней применяется периодическая магнитная фокусировка и сложная система жидкостного охлаждения. В целях обеспечения стабильной работы при значительном коэффициенте усиления, достигающем 54 дБ в режиме насыщения, замедляющая система этой ЛБВ (связанные резонаторы) разделена на три участка с включением между ними поглощающих нагрузок. ЛБВ 796Н имеет рабочую по-

лосу частот 7,5% и $\eta \leq 30\%$ при использовании коллектора с рекуперацией. Масса этой лампы составляет всего 13 кг, т. е. на 10 кг меньше, чем масса ЛБВ 786Н.

КПД. В современных мощных импульсных ЛБВ $\eta = 10 \dots 48\%$. Максимальный общий КПД достигает 55% (см. рис. 3.1,б). Наибольшие КПД получены в результате использования двухсекционной замедляющей системы типа кольцо-стержень со скачком потенциала и применения в ЛБВ двухступенчатого коллектора.

Одним из примеров таких приборов является ЛБВ типа WJ 3632-2 фирмы Watkins-Johnson. Эта ЛБВ на $f = 1,3$ ГГц в полосе пропускания 16% при $P_{\text{н}} = 30$ кВт и $P_{\text{ср}} = 600$ Вт имеет электронный КПД = 43% и общий КПД = 55%. В этой лампе используется сеточное управление электронным лучом и периодическая магнитная фокусирующая система на основе самарий-кобальтовых постоянных магнитов.

В более мощных ЛБВ используются другие замедляющие системы, в том числе системы связанных резонаторов и системы кольцевого типа с опорными стержнями в цельнометаллической обойме (рис. 3.5) [140]. Среди ЛБВ, обладающих высоким КПД, можно также отметить ЛБВ QKW 1701 фирмы Raytheon, 718Н и 839Н фирмы Hughes, которые имеют электронный КПД = 48, 37 и 20% соответственно. ЛБВ QKW 1701 работает на $f = 1, 2 \dots 1,4$ ГГц с $P_{\text{н}} = 300$ кВт, 718Н — на $f = 8,8 \dots 9$ ГГц и 839Н — на $f = 16 \dots 16,5$ ГГц с $P_{\text{н}} = 100$ кВт [70].

Как видно из приведенных данных, мощные импульсные ЛБВ лучше усилителей М-типа по коэффициенту усиления и полосе пропускания, но заметно уступают им по КПД. Поэтому основными направлениями новых разработок этих приборов являются изыскание и реализация новых возможностей для дальнейшего повыше-

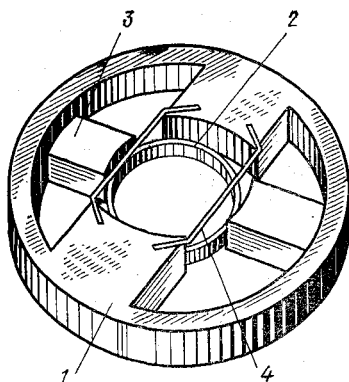


Рис. 3.5. Конструкция элемента замедляющей системы ЛБВ: 1 — цельнометаллическая обойма; 2 — кольцо; 3 — опорные стержни; 4 — перемычки для устранения паразитных колебаний

ния КПД, увеличения выходной импульсной мощности, уменьшения массы и габаритных размеров ЛБВ.

Габариты и масса мощных импульсных ЛБВ зависят от применяемых в них способов фокусировки электронного пучка, систем охлаждения, а также от рабочего диапазона частот и выходной мощности. Общая длина ЛБВ находится в пределах 50 ... 160 см. Наибольшую длину имеют приборы дециметрового диапазона волн. Например, ЛБВ фирмы Varian типа VA131B на $f=1,25 \dots 1,7$ ГГц с $P_{и}=50$ кВт, периодической магнитной фокусировкой и жидкостным охлаждением имеет длину 160 см и $m=41$ кг. ЛБВ коротковолновой части сантиметрового диапазона имеют длину в пределах 50 ... 85 см. Например, ЛБВ фирмы Hughes типа 835H на $f=16 \dots 16,5$ ГГц с $P_{и}=200$ кВт, периодической магнитной фокусировкой и жидкостным охлаждением имеет длину 70 см и $m=12$ кг.

У мощных импульсных ЛБВ $m=7 \dots 80$ кг. При одинаковых системах фокусировки и охлаждения масса приборов возрастает по мере увеличения выходной мощности. Например, ЛБВ фирмы Hughes с периодической магнитной фокусировкой и жидкостным охлаждением типов 306H, 621H и 634H на $f=5,4 \dots 5,9$ ГГц и $P_{и}=20, 50$ и 75 кВт имеют $m=7, 16$ и 24 кг соответственно [70].

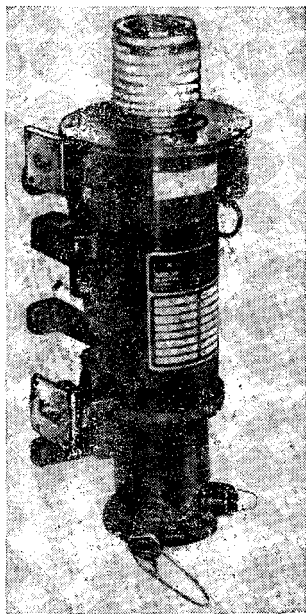


Рис. 3.6. Мощная импульсная ЛБВ типа 751H с периодической магнитной фокусировкой

Долговечность. Изготовители проводят исследования и принимают меры по обеспечению большой долговечности и высокой надежности мощных импульсных ЛБВ. Фирма Raytheon, например, систематически проводит исследования долговечности своих ЛБВ, предназначенных для РЛС с ФАР [127]. В частности, на импульсной ЛБВ

типа QKW1518 с $P_{\text{и}}=160$ кВт был получен средний срок службы 50 тыс. ч, а прогнозируемый срок службы катодно-пушечного узла составил 100 тыс. ч. Фирма Watkins Johnson применяет в ЛБВ типа WJ 340 триодную электронную пушку с теневой сеткой, ресурс которой более 13 тыс. ч.

На рис. 3.6 приведен внешний вид мощной импульсной ЛБВ с сеточным управлением типа 751Н, выпускаемой фирмой Hughes. Эта лампа характеризуется применением волноводных выводов СВЧ энергии, периодической фокусирующей системы из постоянных магнитов и жидкостного охлаждения. Она в полосе частот 8,8 ... 9,8 ГГц имеет $P_{\text{и}}=40$ кВт, $P_{\text{ср}}=400$ Вт, $K_{\text{у}}=50$ дБ и электронный КПД=15% [78].

В последнее время зарубежные фирмы особое внимание уделяют разработкам и выпуску импульсных ЛБВ с $P_{\text{и}} < 10$ кВт. Создание этих ЛБВ вызвано потребностями развития широкополосных систем радиопротиводействия, РЛС самонаведения ракет, самолетных доплеровских РЛС и РЛС с ФАР. Особенности применения ЛБВ в указанных системах выдвигают высокие требования к ширине рабочего диапазона частот, средней мощности, коэффициенту усиления, КПД, а также прочности и компактности конструкции [132].

Технический уровень современных приборов этого типа характеризуется следующими данными.

Таблица 3.2

Основные параметры маломощных импульсных ЛБВ

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{и}}'$, кВт	$P_{\text{ср}}'$, Вт	$K_{\text{у}}'$, дБ	$U_{\text{ас}}'$, кВ	$I_{\text{к}}'$, А
VA134 ²⁾	Varian	0,5...0,6	5	350	35	12,5	2,7
WJ277	Watkins—Johnson	0,7...1,1	10	100	40	9,5	5,0
570Н ¹⁾	Hughes	2...4	1,5	60	30	9,6	2,5
YTES5753A1 ³⁾	Varian	3,1...3,5	10	200	40	15,5	3,1
639Н ²⁾	Hughes	4...8	1	20	30	10	2,0
WX538B	—	5,0...6,5	10	100	40	21	3,4
757Н ²⁾	Hughes	8...12	1,25	100	50	10,5	1,8
810Н ²⁾	"	8...11	1,2	24	40	11	2,2
781Н ²⁾	"	9,3...9,7	2,5	1000	40	13	1,5
ZM3281 ²⁾	Raytheon	8,5...9,6	10	100	35	26	5,0
344Н ²⁾	Hughes	16...17	5	25	40	24	1,5

1) Охлаждение естественное.

2) Охлаждение воздушное принудительное.

3) Охлаждение жидкостное.

Частота и мощность. Импульсные ЛБВ с $P_{и}=1 \dots$
 $\dots 10$ кВт созданы на $f=0,4 \dots 18$ ГГц. Параметры отдельных типов этих приборов приведены в табл. 3.2. Среди выпускаемых импульсных ЛБВ большое число типов составляют широкополосные ЛБВ с $P_{и}=1 \dots$
 $\dots 3$ кВт. Эти приборы создаются преимущественно для применения в аппаратуре радиоэлектронного противодействия и связи.

Для достижения более высокой выходной мощности при сохранении широкой полосы пропускания предпринимаются попытки сложения мощностей нескольких ЛБВ и создания многолучевых ЛБВ с несколькими спиральными замедляющими системами [140, 141]. Применение способа сложения мощностей, например, четырех ЛБВ позволило фирме Varian получить на $f=8 \dots$
 $\dots 16$ ГГц $P_{и}=5$ кВт при потерях мощности при сложении $\sim 1,4$ дБ [141]. Однако реализация этого способа сопряжена с преодолением ряда технических трудностей (необходимость тщательного подбора ЛБВ по катодному напряжению, подбор корректирующих сопротивлений в сеточных цепях и т. д.). Есть основание полагать, что этот способ может получить применение только при создании фирмами комплексированных устройств (субсистем) [141].

Способ увеличения мощности посредством создания многолучевых ЛБВ был опробован фирмой Hughes на экспериментальной модели двухлучевой ЛБВ на $f=$
 $=4 \dots 8$ ГГц [140]. На этой модели получены обнадеживающие результаты.

Полоса. В связи с потребностями развития средств радиоэлектронного противодействия за рубежом создан ряд промышленных типов импульсных ЛБВ с $P_{и}=1 \dots$
 $\dots 5$ кВт, обладающих очень широкой полосой пропускания. Наибольшие значения полосы пропускания ЛБВ с $P_{и}=1$ кВт в настоящее время составляют $100 \dots 110\%$, а при $P_{и}=5$ кВт — 67% [70].

Примерами наиболее широкополосных импульсных ЛБВ могут служить следующие приборы.

ЛБВ типа L5585-50 фирмы Litton на $f=0,7 \dots 2$ ГГц с $P_{и}=1$ кВт при $K_{з}=0,01$ имеет ширину полосы пропускания 96% . Во всей полосе $K_{у}=30$ дБ, $m=4,6$ кг.

ЛБВ типа WJ3635 фирмы Watkins—Johnson при $P_{и}=$
 $=1,25$ кВт работает в полосе частот $2,5 \dots 7,5$ ГГц (т. е. полоса 100%). Она способна работать при очень

большом коэффициенте заполнения, равном 0,1. Ее $K_y = 33$ дБ во всей полосе, $m = 5,1$ кг.

ЛБВ типа М5851 фирмы Teledyne — МЕС при $P_{и} = 1$ кВт и $K_3 = 0,01$ работает в полосе частот 2 ... 7 ГГц (т. е. полоса 110%).

Среди ЛБВ с $P_{и} \approx 5$ кВт наиболее широкую полосу пропускания имеют ЛБВ типов QKW1784 и QKW1807, разработанные фирмой Raytheon [70].

ЛБВ типа QKW1784 при $P_{и} = 5$ кВт на $f = 7 \dots 11$ ГГц имеет полосу 45%. Она работает при коэффициенте заполнения 0,04, $U_{зс} = 11$ кВ, $I_{к} = 2,4$ А с $K_y = 40$ дБ. ЛБВ типа QKW1807 на $f = 7,9 \dots 16$ ГГц при $P_{и} = 4,5$ кВт имеет октавную полосу пропускания, равную 67%. Эта ЛБВ работает при коэффициенте заполнения 0,04, $U_{зс} = 11$ кВ и $I_{к} = 2$ А. Масса этого прибора составляет всего 2,5 кг.

Усиление. У импульсных ЛБВ с $P_{и} = 1 \dots 10$ кВт $K_y = 30 \dots 60$ дБ [70].

Время готовности. Самое малое время готовности достигнуто у импульсных ЛБВ, предназначенных для применения в бортовых передатчиках самолетной и ракетной техники. Разработанные фирмой Raytheon для таких передатчиков малогабаритные и легкие ЛБВ типов QKW1704 и QKW1784 с $P_{и} = 3; 6$ кВт и $K_y = 60, 50$ дБ соответственно имеют время разогрева катода менее 10 с. Такое небольшое время получено за счет использования металлопористых катодов с быстрым разогревом и применения мер по предупреждению пробоев и искрений при включении питающих напряжений. Фирма Raytheon продолжает разработки подобных ЛБВ, имея в виду достигнуть в ближайшем будущем сокращение времени разогрева катодов до 3 с [152].

КПД. Импульсные ЛБВ с $P_{и} = 1 \dots 10$ кВт имеют значительно меньшие КПД по сравнению с мощными импульсными ЛБВ. У этих приборов максимальные значения электронного КПД $= 20 \dots 23\%$ на $f = 1 \dots 10$ ГГц и 15% на $f \approx 18$ ГГц. Максимальные значения общего КПД примерно в 1,2 .. 1,5 раза выше электронного и составляют соответственно 30 и 25%. Так, например, у приведенных выше ЛБВ типов QKW1704 и QKW1784 электронный КПД $= 20\%$, а общий КПД $= 30\%$ [138].

АМ и ЧМ шумы. Вопрос о шумах импульсных ЛБВ возник в связи с применением этих приборов в передающих устройствах доплеровских РЛС [140]. Созда-

ние малошумящего передающего устройства этих РЛС является комплексной задачей, включающей не только создание малошумящей ЛБВ, но и обеспечение высокой стабильности работы источников питания, генератора импульсов и задающего генератора.

Исследования, проведенные фирмой Siemens на ЛБВ типа М5730 на $f=3,1 \dots 3,5$ ГГц с $P_{и}=10$ кВт и $K_{у}=46$ дБ, показали, что при выполнении высоких требований к стабильности работы значение ЧМ шума выходного сигнала составляет 100 дБ в полосе 1 Гц и практически мало зависит от расстояния до несущей частоты вплоть до 100 кГц. Значение АМ шума при этом оказалось пренебрежительно малым по сравнению с ЧМ шумами. Для измерения ЧМ и АМ шума использовались источник питания ЛБВ с пульсацией напряжения в пределах $10^{-6} \dots 10^{-7}$, генератор импульсов с частотой повторения 3,25 кГц, длительностью импульсов 3 мкс и точностью периода повторения импульсов не менее 10^{-5} , а также задающий генератор со спектральной плотностью шума не более 95 дБ/Гц [140].

Габариты и масса. Наибольшим размером ЛБВ с импульсной мощностью до 10 кВт является их длина, которая в зависимости от рабочего диапазона частот находится в пределах 25 ... 180 см. Наименьшую длину (40 ... 60 см) имеют ЛБВ, работающие на $f=3 \dots 18$ ГГц. Длина ЛБВ дециметрового диапазона находится в пределах 60 ... 180 см. В соответствии с этим масса ЛБВ также зависит от рабочего диапазона частот и составляет 1,15 ... 5,0 кг для ЛБВ с $f=3 \dots 18$ ГГц и 5,0 ... 45,0 кг для ЛБВ дециметрового диапазона. Примерами наиболее компактных и легких приборов являются ЛБВ фирмы Raytheon QKW 1734 ($31 \times 6 \times 4,2$ см и $m=1,15$ кг) и QKW 1784 ($35 \times 6,7 \times 4,5$ см и $m=1,85$ кг) [152].

Дальнейшее развитие ЛБВ идет по пути расширения полосы пропускания при одновременном увеличении выходной мощности и КПД. Поэтому надо полагать, что в дальнейшем номенклатура этих приборов будет пополняться новыми типами и в первую очередь, импульсными ЛБВ с $P_{и}=1 \dots 10$ кВт.

3.2. МОШНЫЕ ЛБВ НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА

Мощные ЛБВ непрерывного режима относятся к наиболее быстро развивающейся группе приборов СВЧ. Их

развитие связано в основном с потребностями создания средств связи через искусственные спутники Земли. Основными направлениями совершенствования характеристик мощных ЛБВ являются увеличение выходной мощности, расширение полосы усиливаемых частот и освоение новых частотных диапазонов.

Сложной задачей, возникающей при создании ЛБВ с повышенной мощностью (особенно в коротковолновой части диапазона), является отвод тепла от замедляющей системы. В зарубежной практике известно несколько способов решения этой задачи, но все они сводятся либо к улучшению теплового контакта между замедляющей системой и корпусом прибора (например, путем сварки элементов системы с вакуумной оболочкой), либо к применению охлаждающей жидкости, пропускаемой внутри элементов замедляющей системы. В связи с непрерывным совершенствованием конструкции и улучшением технических характеристик мощных ЛБВ их номенклатура из года в год растет и в настоящее время превышает 300 типов [68, 70].

Технический уровень этих приборов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Мощные усилительные ЛБВ непрерывного режима до 1975 г. работали на $f=0,2 \dots 18$ ГГц. В последнее время при создании новых мощных ЛБВ для средств связи с космическими аппаратами этот диапазон расширился до 38 ГГц [149]. Наличие

Таблица 3.3

**Основные параметры наиболее мощных ЛБВ
непрерывного режима**

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, кВт	K_{y} , дБ	m , кг
MA2050	MIC	0,2...0,4	12	10	—
LD4052A	Nippon E. Co.	5,9...6,4	14	40	23
710H	Hughes	8,7...9,3	10	50	—
VTX6383A1	Varian	10,2...10,7	10	40	34 ¹⁾
TH3517	Thomson—GSF	14,0...14,5	2	—	—
870H	Hughes	14,0...14,5	5	—	27
VTX6600A1	Varian	30...31	2	30	5 ¹⁾
V643	Siemens	30	5	—	—
V684	"	36,0...38,5	1	—	6

¹⁾ Без магнитной фокусирующей системы.

значительного числа типов ЛБВ объясняется большим разнообразием сочетаний их основных технических характеристик и в первую очередь по частоте, мощности, широкополосности и по способам фокусировки электронного луча.

У имеющихся приборов $P_{\text{вых}}=100$ Вт ... 14 кВт. Наибольшие значения $P_{\text{вых}}=10$... 14 кВт на частотах до 10 ГГц, 5 кВт на $f \approx 14$ ГГц и 1 кВт на $f=38$ ГГц (см. рис. 3.1). Основные параметры наиболее мощных ЛБВ приведены в табл. 3.3. Среди них наибольший интерес представляют ЛБВ типов 870Н, V643 и V684.

ЛБВ типа 870Н является первой из числа наиболее мощных приборов на $f=14$... 14,5 ГГц, предназначенных для применения в передающих устройствах наземных станций спутниковой связи. ЛБВ типов V643 и V684 являются также первыми приборами миллиметрового диапазона с большой выходной мощностью. Они разработаны для систем связи со спутниками [127].

Полоса. Большинство ЛБВ непрерывного режима с $P_{\text{вых}}=1$... 2 кВт имеют октавную полосу пропускания (67%). Вместе с тем зарубежной промышленностью выпускается значительное число типов ЛБВ, полоса пропускания которых является еще более широкой. Примеры таких ЛБВ приведены в табл. 3.4. Более мощные ЛБВ характеризуются значительно меньшей полосой пропускания, которая обычно составляет 3 ... 10% от номинальной частоты. Только отдельные мощные ЛБВ обладают более широкой полосой, как, например, MA2050 фирмы Microwave Ass., которая при $P_{\text{вых}}=12$ кВт имеет рекордное значение полосы пропускания, равное 67% (см. табл. 3.3).

Таблица 3.4

Основные параметры отдельных наиболее широкополосных мощных ЛБВ непрерывного режима

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	Δf , %	$P_{\text{вых}}$, кВт	$K_{\text{У}}$, дБ	m , кг
QKW1750	Raytheon	1,0...2,5	86	1,25	30	16
MA2055	Microwave Ass.	1,0...2,5	86	1,5	26	—
MA286	"	1,5...3,9	*89	0,5	26	4,6
MA2064	"	1,5...4,0	91	0,5	23	4,3
QKW1749	Raytheon	2...4	67	2,0	30	27
M5819	Teledyne—MEC	4...8	67	1,0	35	—

В широкополосных мощных ЛБВ в качестве замедляющей системы чаще всего используется спиральная линия, охлаждение которой представляет особенно сложную задачу. Зарубежными фирмами разработано несколько конструктивно-технологических решений по обеспечению отвода тепла от спирали. Например, фирмой NRL в ЛБВ на $f=2 \dots 4$ ГГц с $P_{\text{вых}}=5$ кВт спиральная замедляющая система охлаждается жидкостью, протекающей внутри спирали. Охлаждающая жидкость подводится к спирали через керамические трубочки, которые одновременно служат диэлектрическими опорами спирали.

Усиление. У мощных ЛБВ непрерывного режима $K_y=25 \dots 50$ дБ. У широкополосных ЛБВ обычно $K_y=25 \dots 35$ дБ, у узкополосных ЛБВ $K_y=40 \dots 50$ дБ [70]. Примерами приборов с большим усилением являются ЛБВ типов 710Н фирмы Hughes и VTX6383A1 фирмы Varian.

ЛБВ типа 710Н имеет $K_y=50$ дБ в диапазоне $f=8,7 \dots 9,3$ ГГц при $P_{\text{вых}}=8$ кВт. Она работает при $U_{\text{зс}}=19$ кВ и $I_{\text{к}}=2,2$ А. Масса ЛБВ равна 27 кг. ЛБВ типа VTX6383A1 в диапазоне $f=10,25 \dots 10,75$ ГГц имеет $K_y=53$ дБ при $P_{\text{вых}}=11$ кВт, $U_{\text{зс}}=20$ кВ, $I_{\text{к}}=3,5$ А и $m=13,5$ кг.

КПД. Современные мощные ЛБВ непрерывного режима, рекламируемые зарубежными фирмами, имеют электронный КПД=5 ... 27% и общий КПД=10 ... 35% [70]. Узкополосные ЛБВ, как правило, обладают несколько большим КПД по сравнению с аналогичными по частоте и выходной мощности широкополосными ЛБВ. Среди ЛБВ, обладающих наиболее высокими КПД, можно отметить ряд типов приборов, в том числе ЛБВ MA2003 и MA2055 фирмы Microwave Ass. и 710Н фирмы Hughes.

ЛБВ типа MA2003 при работе в диапазоне $f=0,3 \dots 0,9$ ГГц с $P_{\text{вых}}=1,2$ кВт имеет электронный КПД=27% и общий КПД>35%. ЛБВ типа MA2055 имеют такой же электронный и общий КПД при работе в диапазоне $f=1,0 \dots 2,5$ ГГц с $P_{\text{вых}}=2$ кВт. У ЛБВ типа 710Н (параметры см. в табл. 3.3) электронный $\eta=19\%$ и общий $\eta=35\%$.

Зарубежными фирмами ведутся систематические работы по повышению КПД. Наиболее значительные успе-

хи в этой области достигнуты при конструировании ЛБВ средней мощности для космических аппаратов.

Габариты и масса. Мощные ЛБВ непрерывного режима, так же как импульсные, имеют значительные габаритные размеры, особенно по длине. Общая длина ЛБВ в зависимости от рабочего диапазона частот и выходной мощности лежит в пределах 18 ... 120 см. Наибольшую длину имеют ЛБВ дециметрового диапазона с повышенной выходной мощностью. Диаметр поперечного сечения ЛБВ в зависимости от применяемых способов фокусировки электронного пучка составляет 6... 45 см. Наименьшими поперечными размерами обладают ЛБВ с периодической фокусировкой постоянными магнитами, а наибольшими — ЛБВ с внешними фокусирующими электромагнитами (соленоидами).

Масса мощных ЛБВ непрерывного режима находится также в широких пределах 4,5 ... 80 кг [70].

Долговечность. Как показывают обобщения, приведенные в [41], гарантируемый срок службы мощных ЛБВ непрерывного режима составляет 5 ... 10 тыс. ч, а ожидаемый — 10 ... 20 тыс. ч. В качестве примера наиболее долговечных приборов можно указать ЛБВ типа УН1181 фирмы Siemens на диапазон $f=4, 4 \dots 5,0$ ГГц с $P_{\text{вых}} > 1$ кВт, ожидаемый срок службы которых в аппаратуре космической связи составляет 20 тыс. ч. Достижения по дальнейшему совершенствованию ЛБВ непрерывного режима получены зарубежными фирмами при разработке ЛБВ средней мощности для космических аппаратов и РЛС с ФАР (см. разд. 3.4 и 3.5).

3.3. ДВУХРЕЖИМНЫЕ ЛБВ

Среди большого многообразия типов и конструкций ЛБВ, созданных за рубежом в последнее десятилетие, следует выделить группу мощных ЛБВ, обеспечивающих попеременную работу в непрерывном и импульсном режимах.

Первые сведения о разработке двухрежимных ЛБВ были опубликованы фирмой Watkins — Johnson в 1968 г. [79]. В настоящее время подобные приборы разрабатываются и выпускаются многими фирмами, в том числе Sperry, Hughes, Varian, Microwave Ass. и Watkins — Johnson. Появление и развитие этих приборов вызвано необходимостью совершенствования бортовой РЭА радиоэлектронного противодействия. Использование одной ЛБВ, работающей в двух режимах, позволяет упростить схемные и конструктивные решения по созданию указанной аппаратуры и обеспечивает при

этом существенное сокращение ее габаритов, массы, потребления энергии и общей стоимости.

Для обеспечения эффективной работы аппаратуры противодействия от двухрежимных ЛБВ требуется, чтобы они имели полосу пропускания не менее октавы, $P_{и}=1 \dots 3$ кВт, снижение мощности в непрерывном режиме на 8...10 дБ, высокую скорость переключения с одного режима на другой при невысоком управляющем напряжении [140, 141]. Коэффициент усиления, амплитудно-частотная характеристика и КПД лампы в обоих режимах должны оставаться по возможности неизменными и быть на уровне соответствующих характеристик лучших однорежимных ЛБВ. Достижение указанных требований сопряжено с преодолением ряда технических трудностей и проведением широких исследований по выбору оптимальной конструкции ЛБВ и ее элементов.

Увеличить перепад выходной мощности при переходе с непрерывного режима на импульсный и наоборот и обеспечить идентичность остальных параметров можно различными способами. Известно несколько способов, которые нашли применение в различных промышленных и экспериментальных образцах двухрежимных ЛБВ.

Изменение мощности при переходе с одного режима на другой в разных ЛБВ достигается изменением тока или формы электронного пучка и изменением эффективной длины замедляющей системы или применением двух замедляющих систем с различными фазовыми скоростями. На рис. 3.7 приведено схематическое изображение ЛБВ, в которой ток электронного пучка меняется в результате изменения потенциала управляющей сетки. В этой конструкции ЛБВ используется электронная пушка со сходящимся ламинарным потоком электронов. Ламинарность потока достигается соответствующим выбором конструкции, геометрических размеров и потенциалов теневой и управляющих сеток [133].

В двухрежимной ЛБВ с переменной формой электронного пучка используются полый и сплошной пучки. Полый пучок, обеспечивающий более эффективное взаимодействие с полем замедляющей системы, используют при работе лампы в непрерывном режиме,

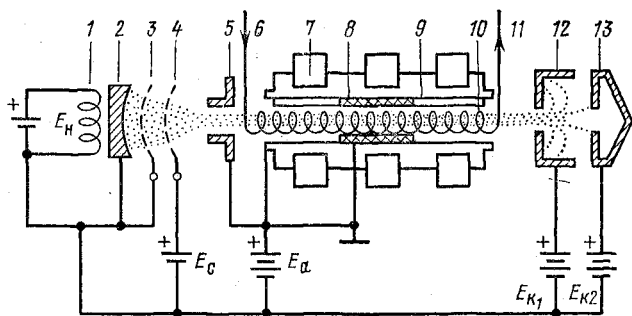


Рис. 3.7. Схематическое изображение двухрежимной ЛБВ:

1 — подогреватель катода; 2 — катод; 3 — теневая сетка; 4 — управляющая сетка; 5 — анод; 6 — ввод СВЧ энергии; 7 — магнит; 8 — поглотитель; 9 — опорные стержни; 10 — спираль; 11 — вывод СВЧ энергии; 12 — первый коллектор; 13 — второй коллектор

а сплошной — в импульсном [139]. В двухрежимной ЛБВ с переменной длиной замедляющей системы в область взаимодействия электронного пучка с полем замедляющей системы вводится дополнительная электронная линза, которая при работе в импульсном режиме сокращает эффективную длину системы. В непрерывном режиме электронная линза обеспечивает использование всей длины замедляющей системы.

Известны также примеры конструирования двухрежимных ЛБВ с двумя замедляющими системами, работающими при разных ускоряющих напряжениях. Низковольтная замедляющая система используется в непрерывном режиме, а высоковольтная — в импульсном [132].

В двухрежимных ЛБВ переход от импульсного режима к непрерывному сопровождается не только уменьшением усиления и КПД, но и сокращением рабочей полосы частот. Поэтому в указанных лампах принимаются дополнительные меры по улучшению их амплитудно-частотных характеристик путем спрямления дисперсионных характеристик замедляющей системы. В частности, в лампе (см. рис. 3.7) для этой цели применена спиральная замедляющая система с дополнительной несимметричной пластинчатой структурой. Эта система обеспечивает равномерную частотную характеристику в результате перераспределения энергии между типами распространяющихся в ней электромагнитных волн [133, 141].

Для увеличения КПД в двухрежимных ЛБВ так же, как и в других мощных ЛБВ, применяют многоступенчатый коллектор с рекуперацией. При переходе с одного режима на другой в целях поддержания КПД на одинаковом уровне изменяют потенциалы ступеней коллектора. В качестве магнитной фокусирующей системы во всех последних разработках двухрежимных ЛБВ используются периодические системы на самарий-кобальтовых магнитах.

В настоящее время известно более двух десятков двухрежимных ЛБВ, разработанных и выпускаемых зарубежными фирмами. Параметры отдельных промышленных типов ЛБВ приведены в табл. 3.5. Лучшими из числа приведенных в таблице являются ЛБВ типов 2119 и 562Н, которые обладают повышенной выходной мощностью и наиболее высоким отношением мощностей (10 и 7 дБ соответственно). Однако большинство имеющихся двухрежимных ЛБВ еще не в полной мере отвечают предъявляемым требованиям к выходной мощности, отношению мощностей в импульсном и непрерывном режимах, идентичности коэффициентов усиления и КПД.

Фирмой Hughes создана экспериментальная ЛБВ в диапазоне $f=2 \dots 4$ ГГц с импульсной мощностью 5 кВт и мощностью в непрерывном режиме 2 кВт [142]. Она является самой мощной из известных двухрежимных ЛБВ. В результате использования многосекционного коллектора с рекуперацией и применения синхронизации скоростей на всем протяжении взаимодействия электронного пучка с высокочастотным полем КПД этой

Таблица 3.5

Основные параметры двухрежимных ЛБВ

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	K_3 , %	$P_{\text{вых}}$ Вт	K_{γ} дБ	η , %
MA2060	Microwave Ass.	1,6...3,2	50 ¹⁾	800	34	30
			100 ²⁾	400	28	22
2119	ITT	1,7...4	5 ¹⁾	1000	—	—
			100 ²⁾	100	—	—
562H	Hughes	2...4	5 ¹⁾	1000 ^{в*}	33	22
			100 ²⁾	200	23	10
STS54402	Sperry	4...8	15 ¹⁾	400	36	20
			100 ²⁾	200	30	14
VTN6265	Varian	5...10	50 ¹⁾	640	40	29
			100 ²⁾	320	35	19
WJ440—2	Watkins—Johnson	5,5...9	50 ¹⁾	500	36	20
			100 ²⁾	250	30	17
M5855	Teledyne MEC	8,5...17	50 ¹⁾	200	55	19
			100 ²⁾	100	45	17

¹⁾ В импульсном режиме.

²⁾ В непрерывном режиме.

лампы в непрерывном и импульсном режимах достигает 45 и 38% соответственно. Этой же фирмой создан экспериментальный образец двухлучевой ЛБВ на диапазон $f=4 \dots 8$ ГГц с двумя замедляющими системами в виде спирали с противозаходной намоткой [142]. В зависимости от режима работы в лампе используется один или два электронных пучка.

Фирма Microwave Ass. разработала сверхширокополосную двухрежимную ЛБВ 10-см диапазона с шириной полосы, равной двум октавам [132]. Эта лампа обеспечивает в непрерывном режиме $P_{\text{вых}}=450$ Вт в импульсном 900 Вт при $K_3=25\%$. В режиме малого сигнала $K_{\gamma}=26$; 32 дБ, а минимальный $\eta=21$; 23% соответственно в непрерывном и импульсном режимах.

Так как имеющиеся двухрежимные ЛБВ не в полной мере обеспечивают постоянство выходной мощности и одинаковый перепад мощности во всей рабочей полосе частот, некоторыми фирмами разработаны и применяются внешние пассивные выравнители. Эти устройства подключаются на вход ЛБВ. Среди них целесообразно отметить в качестве примера выравнитель коэффици-

ента усиления, выпускаемый фирмой Frequensy Contours [132]. Это устройство в диапазоне $f=8,8 \dots 17$ ГГц имеет максимальные потери 1,4 дБ, КСВ=1,75 и допускает подстройку K_y ЛБВ на ± 2 дБ на частотах, отличающихся на ± 1 ГГц.

3.4. ЛБВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Наибольший интерес представляют ЛБВ средней мощности, предназначенные для использования в бортовой космической аппаратуре. Развитие средств космической техники и, в частности, радиоэлектронной аппаратуры спутников связи, непосредственного телевизионного вещания и автоматических межпланетных станций, вызвало необходимость создания специальных усилительных ЛБВ. Исходя из условий применения в бортовой и необслуживаемой аппаратуре космических аппаратов к этим ЛБВ предъявляются очень высокие требования по КПД, долговечности, надежности, габаритам и массе, а также по механической прочности и климатической устойчивости. Зарубежными фирмами создано более 60 типов ЛБВ специально для этой области техники.

Технический уровень этих приборов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. ЛБВ для космической аппаратуры созданы и продолжают разрабатываться на отдельные специально выделенные частоты в диапазоне 1,8 ... 12,7 ГГц. Типичными для первых образцов космической аппаратуры были ЛБВ с $P_{\text{вых}} \approx 20$ Вт. В отдельных

Таблица 3.6

Основные параметры некоторых ЛБВ, использованных в первых образцах космической аппаратуры

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	K_y , дБ	η , %
314H	Hughes	1,8	2,5	33	20
216H	"	2,3	10	23	28
394H	"	2,3	20/5	26/20	33/25
265H	"	7,5	20	46	22
219HX	"	7,7...8	30	—	50
285H	"	8,45	24	35	46
TL12006	AEG—Telefunken	10,9...11,7	20	—	42
TL12022	"	10,7...12,2	20	—	42

Таблица 3.7

Основные параметры наиболее мощных бортовых ЛБВ космических аппаратов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	K_u , дБ	η , %
273Н	Hughes	5,9...6,4	100	33	50
ТН3508В	Thomson—CSF	5,9...6,4	250	45	30
УН1300	AEG—Telefunken	5,9...6,4	200	40	25
УН1301	"	7,7...12,2	200	34	25
ТЛ12200	"	11,7...12,2	200	45	45
ТЛ12450	"	11,7...12,2	450	50	50
Не известен	Litton	~ 12	240	35	56
RW1270	Siemens	11,7...12,5	700	50	—
ТЛ12800	AEG—Telefunken	~ 11	800	50	50

спутниках связи использовались ЛБВ с мощностью 30 и 70 Вт. Такая мощность определялась главным образом возможностями бортовых источников питания (см. табл. 3.6). Для создания новых образцов космической аппаратуры и особенно аппаратуры для прямого приема телевизионных программ на индивидуальные антенны разрабатываются ЛБВ с повышенной выходной мощностью.

Фирмой Hughes созданы образцы ЛБВ на $f=5,9 \dots 6,4$ ГГц с $P_{\text{вых}}=100$ Вт [134]. В этой лампе используются спиральная замедляющая система с коррекцией замедления в выходной части, тепловые трубки для охлаждения замедляющей системы, трехступенчатый коллектор с рекуперацией и встроенный источник питания. Фирмами Hughes, Varian и Litton созданы близкие по параметрам ЛБВ на $f=12$ ГГц с $P_{\text{вых}}=200$ Вт [134].

На Мюнхенской выставке в 1974 г. фирмами Siemens и AEG—Telefunken были продемонстрированы ЛБВ типа RW1270 на $f=11,7 \dots 12,5$ ГГц с $P_{\text{вых}}=700$ Вт и типа ТЛ12800 на $f=11$ ГГц с $P_{\text{вых}}=800$ Вт [143]. Эти лампы рассчитаны на работу в условиях космоса в течение 7 лет. Их основные параметры даны в табл. 3.7. В ЛБВ RW1270 применены трехсекционная замедляющая система в виде полых колец, укрепленных на стержнях, пятиступенчатый коллектор с рекуперацией и с эффективным отводом тепла непосредственно в космическое пространство. В ЛБВ ТЛ12800 (рис. 3.8) применены также трехсекционная замедляющая система в виде связанных резонаторов, пятиступенчатый коллектор

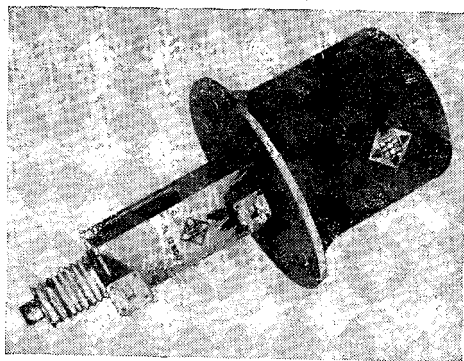


Рис. 3.8. Мощная ЛБВ типа TL12800 для спутниковой связи

с рекуперацией (масса коллектора 4 кг). В выходной секции замедляющей системы предусмотрено плавное изменение фазовой скорости волны, обеспечивающее увеличение КПД. В обеих лампах используется магнитно-периодическая фокусирующая система на основе самарий — кобальтовых магнитов.

Зарубежными фирмами одновременно с созданием ЛБВ повышенной мощности ведутся работы по освоению новых частотных диапазонов и по дальнейшему улучшению параметров ЛБВ с $P_{\text{вых}}=20$ Вт. Ведутся разработки бортовых ЛБВ для космической техники на частоты, лежащие в диапазоне 50 ... 75 ГГц. Фирмой Hughes создана ЛБВ, работающая в этом диапазоне с $P_{\text{вых}}=10$ Вт, полосой пропускания 100 МГц, $K_{\text{y}}=39$ дБ и $\eta=19,7\%$ [134].

Фирма Thomson — CSF, продолжая работу по улучшению параметров этих приборов, создала ЛБВ на $f=10,9 \dots 11,7$ ГГц с полосой 120 МГц и $P_{\text{вых}}=20$ Вт для канадского и европейского спутников связи [138]. В этой лампе используются импрегнированный катод с вольфрамовой губкой, спираль с переменным шагом и трехступенчатый коллектор с рекуперацией. Для крепления спирали применяются диэлектрические стержни из нитрида бора, обладающие хорошей теплопроводностью и малыми потерями. Специалисты этой фирмы работают над созданием в этом же диапазоне частот ЛБВ с высоким КПД, способной работать при

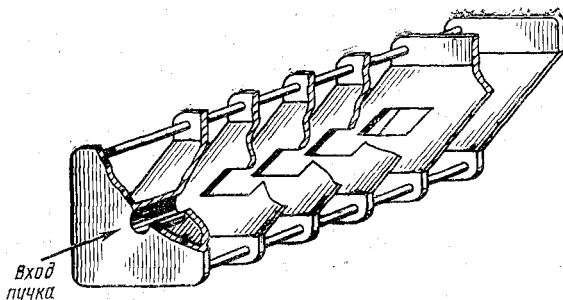


Рис. 3.9. Многоступенчатый коллектор с «мягкой посадкой» электронов

двух значениях $P_{\text{вых}}$ (8; 20 Вт). Эти приборы предполагается использовать в новом поколении спутников связи системы Intelsat.

КПД. По сравнению с другими ЛБВ средней мощности лампы, предназначенные для космической аппаратуры, характеризуются более высокими КПД. Первые промышленные образцы ЛБВ с $P_{\text{вых}}$ до 20 Вт имели общий КПД $\approx 20 \dots 30\%$. У приборов более поздних разработок, в том числе у ЛБВ с $P_{\text{вых}} = 200; 800$ Вт, КПД удалось увеличить до $45 \dots 55\%$. Достижение такого КПД оказалось возможным благодаря применению в ЛБВ многоступенчатых коллекторов с рекуперацией энергии электронного пучка и замедляющих систем с увеличением замедления в выходной секции. Переход в ЛБВ типа TL12006 с одноступенчатого на двухступенчатый коллектор с рекуперацией обеспечил увеличение КПД с 34 до 42% [135]. Фирма Thomson — CSF, основываясь на этом же способе, установила в ранее разработанной ЛБВ на $f = 10,9 \dots 11,7$ ГГц и $P_{\text{вых}} = 20$ Вт трехступенчатый коллектор и спираль с увеличенным замедлением в выходной секции. При этом ей удалось повысить КПД с 35 до 45% и устранить зависимость рассеиваемой на коллекторе мощности от входного сигнала [132].

Японским специалистам удалось увеличить η с 28 до 44% , применяя в ЛБВ с $P_{\text{вых}} = 10$ Вт модифицированный многоступенчатый коллектор, который получил название коллектора с «мягкой посадкой» электронов (рис. 3.9) [144]. Ступени этого коллектора находятся под различными потенциалами: первая ступень имеет потенциал спирали, а последняя — потенциал катода. В ре-

зультате постоянной разности потенциалов, специально выбранной апертуре и различному наклону ступеней удается поочередно в зависимости от кинетической энергии электронов «мягко посадить» весь электронный пучок. При этом появление вторичных электронов сводится к минимуму, а их траектории таковы, что возможность попадания электронов внутрь замедляющей системы полностью исключается.

Фирмой Hughes предпринимались попытки применения в ЛБВ многоступенчатых коллекторов с числом ступеней 10 и даже 15 [125]. Проведенные работы по использованию многоступенчатых коллекторов и применению коррекции замедления в замедляющих системах позволяют надеяться, что в будущем КПД ЛБВ на $f=12$ ГГц будет доведен до 60 ... 65% [145].

Габариты и масса. В большинстве типов ЛБВ, предназначенных для космической техники, для сокращения габаритов и массы используются магнитно-периодические фокусирующие системы на постоянных магнитах. В приборах более поздних разработок в качестве постоянных магнитов используется сплав самарий — кобальт, обладающий наибольшей магнитной энергией (см. табл. 3.8).

ЛБВ на $f=10,9 \dots 11,7$ ГГц с $P_{\text{вых}}=20$ Вт, разработанная фирмой Thomson — CSF, является, по-видимому, самой малогабаритной и наиболее легкой среди ЛБВ этой мощности. Ее масса равна 0,6 кг [138]. Более мощные ЛБВ имеют значительно большие размеры и массу. Например, ЛБВ фирмы Hughes на $f=12,1$ ГГц с $P_{\text{вых}}=240$ Вт имеет габаритные размеры $10 \times 10 \times 32$ см. Эта лампа, как и многие другие мощные ЛБВ, имеет большие размеры коллектора, что обеспечивает ее хорошее охлаждение. Диаметр коллектора указанной ЛБВ равен 23 см, а его длина 14 см. Общая масса этой лампы 11,7 кг [134].

В упоминавшейся ранее ЛБВ TL12800 с выходной мощностью 800 Вт (см. рис. 3.10) ее коллекторная часть имеет массу около 4 кг [143].

Долговечность. Многолетний опыт работы различных космических аппаратов, а также результаты испытаний показывают, что применяемые в этой аппаратуре ЛБВ обладают очень большой долговечностью. Фактический срок активного существования спутников связи первого поколения составлял 3 ... 5 лет. Для нового

поколения космической аппаратуры предусматривается увеличение этого срока до 7 . . . 10 лет [150]. Большая долговечность и высокая надежность ЛБВ указанного назначения обеспечиваются внедрением целого ряда конструктивных и технологических мероприятий, в том числе использование электронных пушек со сходящейся оптикой, снижение токовой нагрузки и рабочей температуры катода, поддержание внутри ламп высокого вакуума и уменьшение теплового сопротивления коллектора.

Применение сходящейся электронной оптики позволяет расширить полезную площадь катода и соответственно уменьшить его удельную нагрузку. Кроме того, эта конструкция электронной пушки способствует уменьшению разрушающего действия ионной бомбардировки, поскольку она локализуется на ограниченном участке центральной части катода.

Фирма Hughes, располагающая наибольшим опытом в области разработки и выпуска ЛБВ с большой долговечностью, в своих приборах использует оксидные катоды, работающие при нагрузке от 0,13 до 0,36 А/см² и $T \leq 750^\circ\text{C}$ [77]. Этой фирмой были проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению зависимости срока службы оксидных катодов от плотности тока эмиссии, в результате которых показано, что теоретические пределы срока службы отдельных ЛБВ приближаются к 100 тыс. ч (рис. 3.10). Однако для реализации этих величин необходимо при изготовлении ЛБВ устранить все возможные причины, ускоряющие отравление катода (натекание, газовыделение деталей лампы и др.).

В целях повышения долговечности ЛБВ фирма Thomson — CSF применяет импрегнированные катоды с нагрузкой не более 0,8 А/см² и рабочей температурой 1080°C [146]. Фирма AEG — Telefunken для уменьшения паразитной

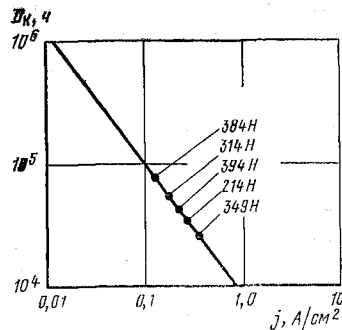


Рис. 3.10. Теоретическая зависимость срока службы оксидных катодов от плотности тока эмиссии.

Точками обозначены ожидаемые значения срока службы отдельных ЛБВ, выпускаемых фирмой Hughes

ионной бомбардировки и повышения долговечности обеспечивает в своих ЛБВ вакуум $1,3 \times 10^{-8}$ Па (10^{-10} мм рт. ст.). Кроме того, перед отправкой потребителю для установки в космическую технику все ЛБВ подвергаются электротермотренировке (старению) в течение 2 тыс. ч с последующей отбраковкой по электрическим параметрам [135, 180].

Результаты испытаний и эксплуатации ЛБВ в космической аппаратуре первого поколения свидетельствуют о достижении высокой долговечности и надежности этих приборов. При этом большое количество ЛБВ разных типов фирмы Hughes в общей сложности проработали без отказов более 800 тыс. ч [41]. Средняя наработка до отказа этих ламп составила 100 ... 300 тыс. ч. Нормы средней наработки до отказа, установленные на фирмах AEG — Telefunken и Thomson — CSF, для ЛБВ космического применения лежат в пределах 250 ... 500 тыс. ч, а реальная наработка каждой ЛБВ превышает 10 тыс. ч [41].

Для обеспечения разработок нового поколения космической аппаратуры продолжают интенсивные исследования по увеличению долговечности ЛБВ с повышенной мощностью. Фирма AEG — Telefunken при разработке ЛБВ TL12800 приняла меры к обеспечению ее высокой долговечности. В этой лампе использован импрегнированный катод с нагрузкой $0,75$ А/см² и рабочей температурой 1000°C . Ожидается, что срок службы катода этой лампы будет превышать 60 тыс. ч [143]. Есть основания полагать, что номенклатура ЛБВ для космической техники в дальнейшем будет пополняться новыми типами с более высокими показателями по мощности, КПД и долговечности.

3.5. МИНИ-ЛБВ

Большое внимание за рубежом уделяется миниатюризации ЛБВ средней мощности. Успехи в этой области стали возможными благодаря завершению в 1971 г. разработки постоянных магнитов на основе сплава самария с кобальтом [136]. Этот сплав (табл. 3.8) обладает высокими магнитными свойствами и позволяет создавать магнитные фокусирующие системы СВЧ приборов небольших размеров с очень малой массой. В США изготовлением магнитов из сплава самария с кобальтом

Таблица 3.8

**Характеристики магнитных материалов, используемых
для создания постоянных магнитов [42]**

Параметр	Сплав					Ферриты
	церия с кобальтом	самария с кобальтом	платины с кобальтом	альнико 5	альнико 8 и 9	
Максимальная магнитная энергия (ВН _{max}), 10 ⁻⁶ Гс·Э	2...7	23	8,5...9,5	5,0...7,5	5...12	1,0...3,5
Коэрцитивная сила, 10 ³ Э	2,8...4,8	7,5...9,0	4,8	0,6...0,7	1,6...2,0	1,8...3,2
Внутренняя коэрцитивная сила, 10 ³ Э	4,8...6,2	25	5,3	0,5...1,5	1,6...2,0	2,5...3,8
Остаточная магнитная индукция, 10 ³ Гс	3,0...5,6	7,5...9,0	6,5	12,5	7,0...11	2,2...3,4
Точка Кюри, °С	500	725	500	860	860	450
Удельный вес, г/см ³	8,3	8,0	15,5	7,3	7,3	4,6...5,0
Ориентировочная стоимость 1 фунта, долл.	100...500	200...500	1500	2,75	4...8	1,5

занимаются фирмы Raytheon, General Electric и Varian. Больших успехов в разработке этих магнитов добилась фирма Varian, осуществляющая разработку и выпуск ЛБВ для фазированных антенных решеток (ФАР) самолетной радиоэлектронной аппаратуры [128].

Созданные с применением самарий-кобальтовых магнитов фокусирующие системы (МПФС) достигли настолько малых размеров, что появилась возможность разработки миниатюрных ЛБВ с поперечным сечением до 2,5 см², длиной 20 см и массой до 100 г. Для реализации этой возможности потребовалось сократить поперечные размеры замедляющей системы и всех электродов ЛБВ. На этой основе создана целая серия миниатюрных ЛБВ, получивших название мини-ЛБВ [42]. В современных конструкциях мини-ЛБВ применены спиральные замедляющие системы с диаметром спирали около 1 мм. Пушечный узел и коллектор имеют также уменьшенные размеры, соответствующие размерам замедляющей системы ЛБВ [43].

Одним из типичных примеров подобных приборов являются мини-ЛБВ типа VTX1683 фирмы Varian [126]. Некоторые характеристики конструкции и режима работы этой ЛБВ приведены в табл. 3.9. Аналогичные мини-ЛБВ разрабатываются и выпускаются также фирмами RCA, Litton и Hughes. Технический уровень указанных приборов характеризуется следующими данными.

Таблица 3.9

Характеристики мини-ЛБВ типа VTX1683

Параметр	Номинальное значение
Рабочий диапазон частот, ГГц	8...12
Выходная мощность, Вт	20
Коэффициент усиления, дБ	30
Общий КПД, %	20
Напряжение накала, В	6,3
Ток накала, А	1,0
Напряжение спирали, В	1750
Ток спирали, мА	4
Напряжение коллектора, В	950
Ток коллектора, мА	70
Общий ток пучка, мА	75
Диаметр спирали, мм	1
Диаметр пучка, мм	0,6
Напряженность магнитного поля, Гс	2250
Габаритные размеры, мм	8,9×19×127
Масса, г	80
Охлаждение	Воздушное

Частота и мощность. Мини-ЛБВ созданы на $f=2,6... .. 38$ ГГц [43, 71]. Ведутся разработки приборов этого типа на частоты более 40 ГГц. Мини-ЛБВ обладают широкой полосой пропускания, которая достигает 40... .. 77% относительно номинальной частоты. Наибольшее количество типов этих приборов предназначено для работы в непрерывном режиме. Выходная мощность их

Таблица 3.10

Основные параметры мини-ЛБВ

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	K_{γ} , дБ	m , кг
L5486	Litton	2,6...5,2	30	46	0,37
QKW1931	Raytheon	4...8	10	40	0,37
VTH6176A3	Varian	6,8...8,8	30	45	0,23
L5487	Litton	5,2...10,4	30	46	0,27
QKW1949	Raytheon	7...18	25	40	0,36
QKW1937	"	8...18	10	45	0,34
VTM6196A5	Varian	8...16	25	50	0,29
VTU6196A7	"	12...18	20	40	0,29
292H	Hughes	17...21	4	52	0,75
863H	"	36,8...38	2	35	0,67

в непрерывном режиме находится в пределах 1 ... 30 Вт (см. рис. 3.1), а в импульсном режиме достигает 2 ... 3 кВт. Основные параметры отдельных типов мини-ЛБВ приведены в табл. 3.10.

Усиление. Коэффициент усиления мини-ЛБВ без особых трудностей можно довести до 50 дБ. Обычные значения K_u этих приборов составляют 30 ... 40 дБ.

Коэффициент шума. Для приборов средней мощности $K_{ш}$ не является определяющим и поэтому в каталогах, как правило, не указывается. Однако о коэффициенте шума мини-ЛБВ можно судить по отдельным сообщениям зарубежных фирм. Например, фирма Varian, сообщая в своем каталоге [83] подробные сведения о параметрах выпускаемых мини-ЛБВ, приводит максимальные значения коэффициента шума отдельных приборов. В частности, у ламп типов VTH6176A1 и VTM619A1 на $f=5,2 \dots 10,4$ ГГц и $f=8 \dots 18$ ГГц с $P_{\text{вых}}=20$ Вт $K_{ш}=35$ дБ.

КПД. При $P_{\text{вых}}=10 \dots 30$ Вт в непрерывном режиме в диапазоне $f=2,6 \dots 26$ ГГц у мини-ЛБВ электронный КПД=10 ... 20%, общий КПД=15 ... 30%.

Идентичность характеристик. Так как мини-ЛБВ применяются в ФАР, к ним предъявляются высокие требования по фазовой чувствительности к изменениям напряжения замедляющей системы, выходной и входной мощности, а также по разбросу фазовых и усилительных характеристик от прибора к прибору.

Фирма RCA в своих мини-ЛБВ достигла минимальных значений указанных характеристик. В частности, расхождение между фазовыми характеристиками при любой выходной мощности не превышает $\pm 25^\circ$, фазовая чувствительность по напряжению на спирали — $2,5^\circ/\text{В}$, по входной мощности — $4^\circ/\text{дБ}$ и по температуре — $0,12^\circ/\text{C}$. Достижение малого разброса фазы и коэффициента усиления от прибора к прибору требует большой тщательности и точности изготовления всех деталей ЛБВ, особенно ее спиральной линии. Точность изготовления спиралей, например, оценивается разбросом рабочего напряжения ЛБВ в пределах 2 В. Для полной идентификации ЛБВ по фазе и усилению в схемах их питания от единого источника применяются корректирующие сопротивления в цепях катодов.

Габариты и масса. Мини-ЛБВ по сравнению с обычными ЛБВ одинаковой мощности имеют примерно вдвое

меньшее напряжение питания, вдвое меньшую длину и в пять раз меньший объем. Габаритные размеры мини-ЛБВ с $P_{\text{вых}}=20$ Вт в диапазоне $f=2,6 \dots 8$ ГГц не превышают $1,8 \times 2,5 \times 17,8$ см, а в диапазоне $f=8 \dots 18$ ГГц — $0,9 \times 1,9 \times 12,7$ см. Масса мини-ЛБВ находится в пределах $0,08 \dots 0,5$ кг. Известно много типов этих приборов, имеющих $m=80$ и 90 г. Кроме указанной выше мини-ЛБВ VTX6183 с $m=80$ г, можно еще указать, например, мини-ЛБВ YH1050 фирмы AEG — Telefunken на $f=4,5 \dots 5,0$ ГГц с $P_{\text{вых}}=2$ Вт, $m=90$ г.

Мини-ЛБВ благодаря своим чрезвычайно малым размерам и массе не уступают своим твердотельным аналогам и все шире используются в качестве активных элементов ФАР. Например, фирма Raytheon в разработке для ВМФ США корабельной системы обнаружения РЛС типа SLQ-32 (V) в ФАР этой системы использует 48 мини-ЛБВ средней мощности на $f=8 \dots 10$ и $10 \dots 20$ ГГц, изготавливаемых фирмами Varian и ITT [154].

3.6. ЛБВ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Дальнейшим шагом в области миниатюризации электровакуумных СВЧ приборов явилось создание ЛБВ на печатных платах с применением пленочной технологии [46].

Известны две конструктивные разновидности печатных ЛБВ: с электронным пучком, расходящимся в радиальном направлении и электростатической фокусировкой электронов [130]; с прямолинейным пучком электронов и магнитной фокусировкой [131].

Характерная особенность первой конструкции — радиальное направление движения электронов. Замедляющая система такой ЛБВ состоит из двух плоских спиралей, выполненных печатным способом на диэлектрической подложке круглой формы (рис. 3.11). Элек-

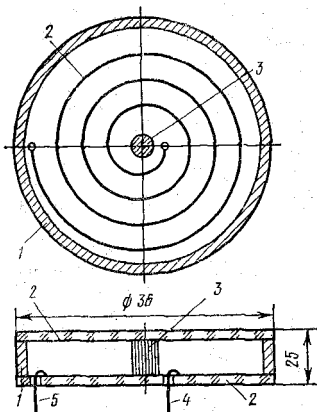
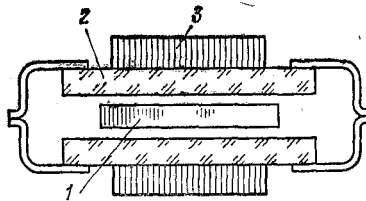


Рис. 3.11. Схематическое изображение устройства печатной ЛБВ с радиальным электронным потоком:

1 — коллектор (корпус прибора); 2 — спиральная замедляющая система на диэлектрической подложке; 3 — цилиндрический катод; 4 и 5 — ввод и вывод СВЧ энергии

Рис. 3.12. Схематическое изображение устройства печатной ЛБВ с линейным электронным потоком (вид со стороны коллектора):

1 — катод; 2 — керамическая подложка с замедляющей системой; 3 — магнит



троны создаются цилиндрическим катодом, расположенным в геометрическом центре подложек. Для регулировки тока используется ускоряющий электрод в виде цилиндрической сетки. В этих ЛБВ используют электронный пучок с малой фазовой скоростью, обеспечивающий работу прибора при напряжениях замедляющей системы ~ 200 В. Обработанный электронный пучок собирается коллектором, который одновременно является корпусом прибора. Ввод и вывод СВЧ энергии осуществляется с помощью отрезков коаксиальных линий, присоединенных к началу и концу спиралей, а также к корпусу прибора. Вся конструкция ЛБВ имеет форму галеты диаметром 18...20 см и высотой 2,5 см [130].

В конструкции с прямолинейным пучком электронов замедляющая система в виде меандровой линии и все остальные детали прибора, кроме катода, напечатаны на двух диэлектрических подложках. Они одновременно служат корпусом прибора. Электронный пучок пропускается между подложками с помощью электрического поля системы и фокусирующего магнитного поля постоянных магнитов. Магниты в виде плоских брусков располагаются на внешней стороне подложек. Устройство такой ЛБВ схематически показано на рис. 3.12, а внешний вид одной из конструкций замедляющих систем, выполненных методом печатных плат — на рис. 3.13.

Печатные ЛБВ обладают рядом преимуществ перед ЛБВ обычной конструкции. Они имеют малые размеры и массу, повышенную устойчивость к воздействию ударов и вибрации. Производственные затраты при их изготовлении невелики. Применяемая при изготовлении печатных ЛБВ пленочная технология позволяет обеспечить высокую точность изготовления мелкоструктурных замедляющих систем с жесткими допусками и автоматизировать их производство. Эта технология открывает также возможность изготовления сложных замедляющих систем, трудно выполнимых обычными способами. Специалисты фирмы Varian предполагают, что при массовом производстве печатных ЛБВ их цена может быть снижена до 100 долл., в то время как цена обычных ЛБВ составляет 1000...2000 долл. [137].

Обе конструктивные разновидности печатных ЛБВ находятся в настоящее время в стадии разработки. В одном из разрабатываемых фирмой Varian приборов с прямолинейным пучком на частоте 1 ГГц в полосе

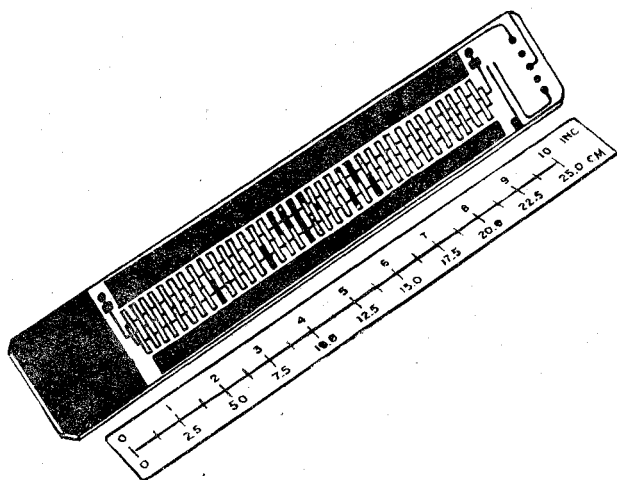


Рис. 3.13. Замедляющая система и другие элементы ЛБВ, нанесенные на керамическую подложку

частот 25% получено $K_y=10$ дБ при $P_{\text{ВЫХ}} \approx 20$ Вт в непрерывном режиме и общий КПД=28% [128]. Этой же фирмой ведется разработка печатной ЛБВ с повышенным КПД на $f=2,2 \dots 2,7$ ГГц при $P_{\text{ВЫХ}}=20$ Вт в непрерывном режиме. Путем изменения шага по длине замедляющей системы и применения двухступенчатого коллектора с рекуперацией электронов предполагается достигнуть $\eta \approx 35\%$ [132].

Фирма Varian разрабатывает печатную ЛБВ для импульсной работы на $f \approx 3$ ГГц с $P_{\text{ВЫХ}}=2$ кВт в импульсе при $K_a=0,008$. Этот прибор состоит из двух каскадов с $K_y=20$ дБ.

В первых моделях радиальных ЛБВ на $f=0,5 \dots \dots 1$ ГГц усиление получить не удалось из-за больших потерь в замедляющей системе. В процессе разработки потребовалось усовершенствовать технологию печатания спирали, а именно нанесения на подложку вначале молибденового слоя и затем медного. Это позволило увеличить толщину слоя спирали до 25 мкм и снизить потери. Ожидается получить в указанном диапазоне $P_{\text{ВЫХ}}=100$ Вт в непрерывном режиме, $\eta=30\%$ и $K_y=30$ дБ [130].

Печатные ЛБВ могут быть созданы на мощности 500 Вт в непрерывном и 10 кВт в импульсном режимах

на $f \approx 1$ ГГц и на $f = 10$ ГГц с мощностью 30 Вт в непрерывном и 100 Вт в импульсном режимах [131]. Одновременно с разработкой печатных ЛБВ исследуется возможность создания на этой основе гибридных приборов типа ЛОВ — ЛБВ или нескольких ЛБВ, работающих на различных частотах. Простота устройства гибридных приборов на печатных схемах и их невысокая стоимость позволяют разрабатывать РЭА одноразового действия [137].

3.7. МАЛОШУМЯЩИЕ И МАЛОМОЩНЫЕ ЛБВ

Малошумящие и маломощные ЛБВ благодаря широкой полосе усиливаемых частот, низкому уровню шумов и большому усилению нашли широкое применение в приемных устройствах радиолокационных и радиорелейных станций и в другой широкодиапазонной аппаратуре в диапазонах дециметровых, сантиметровых и миллиметровых длин волн. Маломощные ЛБВ, кроме того, применяются для усиления сигналов в промежуточных каскадах приемных устройств и для предварительного усиления в мощных генераторах СВЧ.

В связи с развитием твердотельных СВЧ усилителей количество вновь разрабатываемых типов малошумящих и маломощных ЛБВ резко сократилось, а разработки сверхмалошумящих ЛБВ (с $K_{ш} < 6$ дБ) практически прекратились. Многие зарубежные фирмы, ранее занимавшиеся разработкой этих приборов, например фирма Watkins — Johnson, переключились на создание транзисторных и других полупроводниковых усилителей. Вместе с тем малошумящие и маломощные ЛБВ пока еще составляют значительную часть (~30%) в общем промышленном ассортименте ЛБВ, выпускаемом зарубежными фирмами [42, 70].

Технический уровень указанных приборов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Малошумящие и маломощные ЛБВ выпускаются для работы на $f = 0,5 \dots 40$ ГГц. В последнее время этот диапазон расширен до 60 ГГц после завершения фирмой Watkins — Johnson разработки малошумящей ЛБВ на диапазон $f = 40 \dots 60$ ГГц. В указанном диапазоне частот фирма получила $K_{ш} < 18$ дБ, $K_{у} = 35$ дБ и $P_{вых} \approx 20$ мВт [151]. Выходная мощность малошумящих и маломощных ЛБВ лежит

Таблица 3.11

Основные параметры сверхмаломощных ЛБВ

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$K_{ш}$, дБ	K_u , дБ	$P_{вых}$, мВт	η , кг
WJ278	Watkins—Johnson	0,5...1,0	4,5	25	1	7,7
WJ374	"	1,0...2,0	5,0	25	1	7,7
WJ355	"	2,2...2,3	3,7	25	0,1	7,7
N1047M	Englich Electric V.	2,7...3,2	4,0	24	1,5	0,8
VTC4460P1	Varian	4,4...5,25	5,0	25	5	5,0
VTC4414S6	"	5,85...7,25	6,5	30	20	3,4
VTX4403P9	"	8,9...9,6	6,0	25	—	6,8
WJ345-17	Watkins—Johnson	12,2...12,7	6,0	25	—	7,2
WJ371-8	"	15,7...17,7	8,5	33	10	8,4
M5365	Teledyne—MEC	18...26	13	25	5	—
M5366	То же	26...40	16	25	5	—

в пределах от долей милливатта до 3 Вт. Наименьшие значения относятся к сверхмаломощным ЛБВ, выходная мощность которых составляет преимущественно 0,1 ... 10 мВт.

Коэффициент шума. Минимальные значения $K_{ш}$, достигнутые на сверхмаломощных ЛБВ, составляют 3,5 дБ на $f=0,5 \dots 3$ ГГц, 6 дБ на $f=10$ ГГц и около 10 дБ на $f=25$ ГГц (см. рис. 3.5). Параметры некоторых типов сверхмаломощных ЛБВ приведены в табл. 3.11. В настоящее время эти значения $K_{ш}$ уже не являются рекордно малыми для СВЧ усилительных приборов. По этому параметру сверхмаломощные ЛБВ сейчас уступают не только параметрическим усилителям, но и усилителям на СВЧ транзисторах.

Твердотельные СВЧ усилители помимо этого обладают преимуществами по габаритным размерам, массе и энергопотреблению, поэтому разработки новых типов сверхмаломощных ЛБВ в диапазонах, освоенных полупроводниковыми приборами, практически не ведутся. Маломощные ЛБВ с $P_{вых}=1 \dots 3$ Вт в диапазоне $f=1 \dots 18$ ГГц имеют $K_{ш}=12 \dots 18$ дБ. В последнее время разработки подобных приборов проводятся в диапазоне частот более 10 ГГц в основном для применения в системах радиопротиводействия [141].

Полоса пропускания. Большинство сверхмаломощных ЛБВ имеют полосу пропускания не менее 10% от номинальной частоты, хотя отдельные типы этих при-

Таблица 3.12

Основные параметры наиболее широкополосных
малошумящих ЛБВ

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$K_{ш}$, дБ	K_y , дБ	$P_{вых}$, мВт	m , кг
WJ3023	Watkins—Johnson	2...8	12,5	20	318	—
M9337	Teledyne — MEC	2...12	20	22	4	1,8
WJ3022	Watkins—Johnson	4...12	13,5	25	500	—
WJ495	"	7,2...18	12,5	35	10	1,85 ¹⁾
WJ3024	"	8...18	14	20	318	—
M9220H	Teledyne — MEC	8...18	15	60	50	0,9
WJ3105-1	Watkins—Johnson	18...40	17	35	4	2,5 ¹⁾

¹⁾ С источником питания.

боров обладают полосой пропускания до 40%. Наиболее широкополосными являются маломощные ЛБВ. Большинство из них имеют полосу пропускания, равную октаве (~67%). Вместе с тем разработано много типов ЛБВ с более широкой полосой, достигающей двух октав (табл. 3.12). Эти ЛБВ предназначены главным образом для применения в средствах радиопротиводействия [141].

Коэффициент усиления. Типичное значение для сверхмалошумящих ЛБВ $K_y=25$ дБ, что вполне достаточно для сведения к минимуму влияния шумов последующих каскадов приемных устройств. Для маломощных ЛБВ $K_y=25 \dots 60$ дБ [71].

Напряжение. Малошумящие ЛБВ в зависимости от диапазона частот работают при $U_{зс}=115 \dots 700$ В. Маломощные ЛБВ имеют более высокие рабочие напряжения, которые при $P_{вых} \approx 3$ Вт достигают 4 кВ [71].

Масса. Малошумящие и маломощные ЛБВ имеют сравнительно небольшие габаритные размеры и массу. Это достигается в основном применением малогабаритных СВЧ выводов и периодической магнитной фокусирующей системы. У малошумящих и сверхмалошумящих ЛБВ $m=0,8 \dots 8,5$ кг. При этом отдельные типы ЛБВ имеют встроенный твердотельный источник питания.

Долговечность. Гарантируемый срок службы малошумящих и маломощных ЛБВ достигает 10 тыс. ч. Фактический средний срок службы во много раз превосходит это значение. Высокая долговечность подобных прибор-

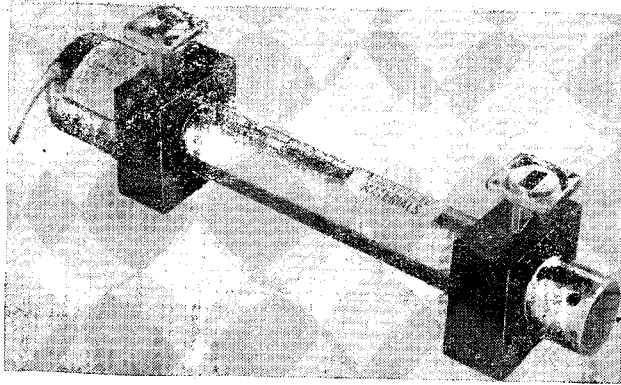


Рис. 3.14. Малошумящая ЛБВ типа TWJ30 на $f=12 \dots 18$ ГГц

ров обеспечивается сравнительно небольшими удельными нагрузками катода, малой мощностью электронного луча, умеренными тепловыми нагрузками приборов.

По конструктивному оформлению указанные ЛБВ неоднотипны. Они различаются между собой по типу высокочастотных выводов, по способу фокусировки электронного луча и общему конструктивному решению. Один из примеров конструкции малошумящих ЛБВ показан на рис. 3.14. Эта ЛБВ выпускается фирмой M—O Valvo с волноводными выводами и периодической магнитной фокусировкой. В диапазоне частот $12 \dots 18$ ГГц ее $K_{ш}=13,5$ дБ, $K_{у}=35$ дБ и $P_{вых}=3$ мВт. Она работает при $U_{зс}=1,4$ кВ и $I_{к}=0,6$ мА. Ее $m=2,4$ кг [81]. Маломощные ЛБВ имеют примерно такое же конструктивное оформление, характеризующееся применением периодической магнитной фокусировки и малогабаритных коаксиальных и волноводных выводов.

3.8. МОДУЛИ НА ЛБВ

В последнее десятилетие уделяется большое внимание созданию модулей на ЛБВ (СВЧ суперкомпонентов), представляющих собой полностью законченное функциональное устройство (усилитель, передатчик и т. д.). Интерес к созданию таких модулей связан с тем, что этот метод конструирования устраняет трудности по стыковке входящих в них элементов, исключая

100

ет ошибки в установлении режимов работы ЛБВ, способствует повышению надежности и снижению стоимости радиоэлектронной аппаратуры.

Вначале фирмой Watkins—Johnson были созданы модули малошумящих усилителей и усилителей средней мощности, представляющие собой сочетание ЛБВ и источника питания [152]. В более поздних разработках в состав модулей включалось все большее число активных и пассивных элементов, обеспечивающих согласование с нагрузкой, защиту от электрических и тепловых перегрузок, автоматическое регулирование питающих напряжений и т. д. Примером более сложных и наиболее законченных модулей являются миниатюрные усилители, разработанные фирмой Varian на основе мини-ЛБВ с $P_{\text{вых}}=20$ Вт в непрерывном режиме на $f=5,2 \dots 10,4$ ГГц и $f=8 \dots 18$ ГГц [153]. В этих усилителях предусмотрены устройства автоматического регулирования напряжений, защиты от тепловых и электрических перегрузок, искрений и от рассогласования нагрузки. Вместе с тем общая масса этих модулей не превышает 2,5 ... 4,3 кг. Эта же фирма разработала усилитель типа V2H-699674, рассчитанный на работу в диапазоне $f=8 \dots 18$ ГГц с $P_{\text{вых}}=20$ Вт в непрерывном режиме [84]. Его максимальный $K_{\text{y}}=45$ дБ, а минимальный $K_{\text{ш}}=35$ дБ. Габаритные размеры этого усилителя не превышают $6,4 \times 14 \times 24$ см.

Фирма Hughes закончила разработку усилителя на ЛБВ типа 1277H04-028, предназначенного для передатчиков наземных передатчиков спутниковых систем связи на $f=13,9 \dots 14,3$ ГГц с $P_{\text{вых}}=20$ Вт. Этот усилитель имеет воздушное охлаждение, периодическую магнитную фокусирующую систему, встроенный твердотельный источник питания, устройства автоматической последовательной (с задержкой) подачи напряжений на электроды ЛБВ и ее защиты от тепловых и электрических перегрузок. Габаритные размеры этого усилителя составляют $34 \times 39 \times 48$ см, а $m=9$ кг [148].

Выпуск модулей малошумящих усилителей и усилителей средней мощности в США составляет около 30% от общего выпуска и продажи СВЧ суперкомпонентов [152, 153]. Фирмой Teledyne—MЕС, являющейся ведущей в области создания модулей на мощных импульсных ЛБВ, выпускаются передающие модули с $P_{\text{и}}=1$ кВт. В них кроме ЛБВ содержатся источник питания, задаю-

щий СВЧ генератор, модулятор на основе гибридного электронно-полупроводникового прибора. Модулятор обеспечивает получение τ от долей до нескольких микросекунд при K_3 до 0,04 и времени нарастания импульса менее 30 нс. Объем такого передатчика 77 см³, а $m=18$ кг.

Фирма Litton в настоящее время производит модули на ЛБВ в диапазоне $f=1 \dots 20$ ГГц с $P_{\text{вых}}=1$ мВт 20 кВт различного назначения, в том числе для РЛС посадки самолетов. Лабораториями Spese Microwave создана серия усилителей с октавной полосой пропускания и $P_{\text{вых}}=1$ кВт на диапазон $f=1 \dots 18$ ГГц [148]. В этих усилителях может быть использована логическая схема для автоматического управления всеми его функциями.

Выпуск модулей на мощных ЛБВ в США в 1975 г. составил 34% от общего объема продажи СВЧ суперкомпонентов, а в 1980 г. ожидается, что выпуск возрастет до 38% [153].

Глава 4 КЛИСТРОНЫ

Клистроны являются весьма распространенным видом приборов СВЧ, получившим широкое применение в различной радиотехнической и электронной аппаратуре [1]. В зависимости от принципа действия они разделяются на пролетные и отражательные. У пролетных клистронов электроны перемещаются в одном направлении, пронизывая зазоры (сетки) одного или нескольких резонаторов (рис. 4.1). У отражательных клистронов электроны после пролета сетки (зазора) резонатора возвращаются в резонатор тормозящим полем специального электрода-отражателя (рис. 4.2).

Пролетные клистроны используются в качестве усилителей и генераторов СВЧ колебаний как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы, а отражательные клистроны предназначены в основном для генерации СВЧ колебаний [31, 32]. Импульсные усилительные клистроны применяются в РЛС различного назначения и в линейных ускорителях элементарных частиц. Усилительные клистроны непрерывного режима имеют

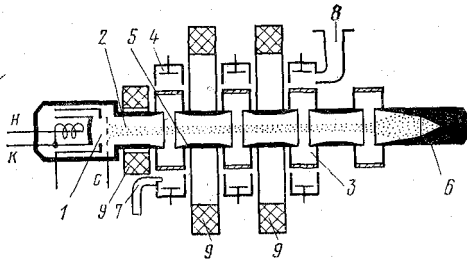


Рис. 4.1. Устройство пролетного усилительного клистрона:

1 — электронная пушка; 2 — электронный пучок; 3 — вакуумная часть резонатора; 4 — вневакуумная часть резонатора с элементом настройки; 5 — пролетная труба; 6 — коллектор; 7 и 8 — ввод и вывод СВЧ энергии; 9 — фокусирующий соленоид

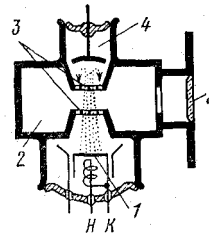


Рис. 4.2. Устройство отражательного клистрона:

1 — электронная пушка; 2 — резонатор; 3 — сетки резонатора; 4 — отражатель; 5 — вывод СВЧ энергии

более широкие области применения. Они, в частности, используются в передатчиках телевизионных станций, в аппаратуре тропосферной и спутниковой связи, в установках СВЧ нагрева и др. Генераторные пролетные клистроны применяются в доплеровских РЛС, а также в передатчиках телевизионных станций.

Самое широкое применение получили отражательные клистроны. Они используются в качестве маломощных передатчиков доплеровских РЛС, в передающих устройствах аппаратуры связи, в качестве генераторов СВЧ колебаний в измерительной аппаратуре и генераторов накачки параметрических усилителей, гетеродинов приемных устройств РЛС и аппаратуры связи.

Пролетные клистроны в отличие от приборов магнетронного типа устроены так, что их основные узлы для создания и формирования электронного потока, обеспечения его взаимодействия с высокочастотным полем, группирования электронов и для отбора отработавших электронов разделены и конструктивно не зависят друг от друга. Это позволяет оптимизировать конструкцию каждого узла клистрона и обеспечить более высокую долговечность и надежность его работы. Усилительные клистроны по сравнению с магнетронными усилителями и ЛБВ М-типа имеют очень большой коэффициент усиления и могут работать при использовании маломощного высокостабильного возбудителя, что обеспечивает более стабильную работу передающего устройства.

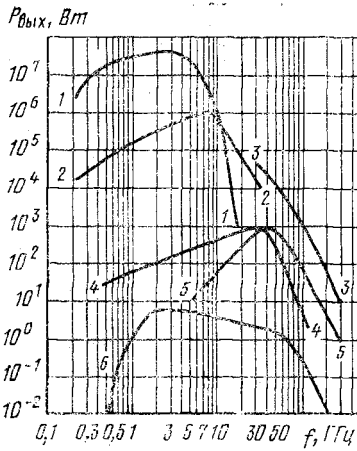


Рис. 4.3. Зависимость максимальной выходной мощности клистронов различных видов от частоты:

1 — усилительных в импульсном режиме; 2 — усилительных в непрерывном режиме; 3 — генераторных в импульсном режиме; 4 — генераторных с распределенным взаимодействием; 5 — генераторных двухрезонаторного типа; 6 — отражательных в непрерывном режиме

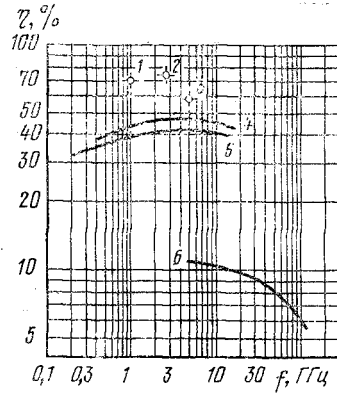


Рис. 4.4. Максимальное и типовое значения КПД пролетных клистронов:

1 — X3074 (75 кВт в непрерывном режиме); 2 — VKS7773 (50 кВт в непрерывном режиме); 3 — VKC7790 (10 кВт в импульсном режиме); 4 — усилительных в импульсном режиме; 5 — усилительных в непрерывном режиме; 6 — генераторных средней мощности

Основными недостатками пролетных клистронов являются их большие размеры и масса, высокие рабочие напряжения, сложность механической перестройки частоты, узкополосность.

Отражательные клистроны по сравнению с другими электровакуумными приборами СВЧ малой мощности имеют относительно простую конструкцию, небольшие размеры, низкие рабочие напряжения, возможность электронной перестройки частоты и обеспечивают при принятии необходимых мер очень высокую стабильность частоты и малые шумы.

Усилительные и генераторные клистроны в зависимости от их назначения имеют различные выходные мощности и рабочие частоты. На рис. 4.3 показаны зависимости максимальных значений выходной мощности от частоты клистронов, рекламируемых зарубежными фирмами [71]. Как видно из приведенных графиков, наибольшая выходная мощность в импульсном режиме получена на пролетных усилительных и генераторных

клизотронах. В непрерывном режиме максимальная выходная мощность получена на усилительных клизотронах.

Более высокие предельные рабочие частоты имеют пролетные генераторные (до 300 ГГц) и отражательные (до 220 ГГц) клизотроны. Все виды пролетных и отражательных клизотронов изготавливаются для работы как на фиксированных частотах, так и с механической перестройкой частоты. Механическая перестройка частоты осуществляется изменением рабочей частоты резонаторов клизотрона. Диапазон механической перестройки в зависимости от применяемого способа перестройки $\Delta f = 2 \dots 15\%$. Отражательные клизотроны наряду с механической перестройкой имеют электронную перестройку частоты в небольших пределах (до 0,5%).

Усилительные клизотроны как импульсного, так и непрерывного режимов обеспечивают усиление в достаточно широкой полосе частот, достигающей у наиболее широкополосных приборов 12 ... 15% от номинальной частоты.

По эффективности работы пролетные усилительные клизотроны не уступают мощным ЛБВ, а по КПД приближаются к приборам магнетронного типа. Максимальный электронный КПД, достигнутый на отдельных типах клизотронов непрерывного режима, составляет 70 ... 74% (рис. 4.4). Типовые значения η импульсных усилительных клизотронов лежат в пределах 40 ... 45%, а усилительных клизотронов непрерывного режима — 35 ... 40%. КПД пролетных генераторных клизотронов средней мощности 5 ... 11%.

Отражательные клизотроны имеют наименьший η , который у приборов малой мощности составляет доли процента, а у приборов повышенной мощности — 2 ... 3%.

Клизотроны в зависимости

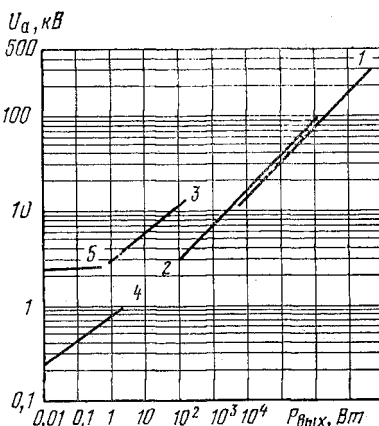


Рис. 4.5. Типовые зависимости анодного напряжения от выходной мощности клизотронов: 1, 2 — усилительных в импульсном и непрерывном режимах; 3 — пролетных генераторных; 4 — отражательных сантиметрового диапазона; 5 — отражательных миллиметрового диапазона

от конструкции, назначения и выходной мощности работают при $U_a=250$ В ... 300 кВ. Типовые зависимости анодного напряжения от выходной мощности для различных видов клистронов приведены на рис. 4.5. Как видно из рисунка, наименьшие анодные напряжения имеют отражательные клистроны (250 В ... 2,5 кВ), а наибольшие — импульсные усилительные клистроны (10 ... 300 кВ).

При работе клистронов с импульсной мощностью более 10 МВт из-за наличия жесткого рентгеновского излучения необходимы специальные средства защиты обслуживающего персонала.

Клистроны в отличие от приборов магнетронного типа имеют большие габаритные размеры и массу. В зависимости от конструкции и выходной мощности длина клистронов лежит в пределах 5 см ... 4,6 м, а их масса — 50 г ... 1000 кг. Компактными и легкими являются отражательные и пролетные генераторные клистроны малой и средней мощности. Габаритные размеры и особенно масса многорезонаторных усилительных клистронов импульсного и непрерывного режимов значительно зависят от способа фокусировки электронного пучка. Большие габариты и массу имеют клистроны с постоянными магнитами и электромагнитной фокусирующей системой. Например, импульсный усилительный клистрон с $P_{и}=24$ МВт на $f=2,856$ ГГц, применяемый в ускорителях элементарных частиц, имеет фокусирующий постоянный магнит $m=363$ кг [164]. Фокусирующий электромагнит для клистрона с $P_{вых}=50$ кВт в непрерывном режиме на $f=0,5$ ГГц имеет $m=270$ кг, в то время как масса самого клистрона 90 кг [70].

Значительное уменьшение габаритных размеров (кроме длины) и массы клистронов достигается использованием периодической электростатической фокусировки и магнитно-периодических фокусирующих систем. Так, например, масса усилительного клистрона с периодической электростатической фокусировкой на $f=2,1$ ГГц и $P_{вых}=1$ кВт составляет всего 2,27 кг, что является рекордным по значению отношения мощности к массе (440 Вт/кг). Применение магнитно-периодической фокусирующей системы для усилительного клистрона на $f\approx 10$ ГГц и $P_{и}=120$ кВт позволило сократить его общую массу до 3,6 кг [161].

Зарубежными фирмами в настоящее время реклами-

руется около 1500 типов клистронов различного назначения с большим разнообразием технических и эксплуатационных характеристик, причем общее количество этих приборов остается примерно постоянным на протяжении более десяти лет [47]. Вместе с тем выпускаемая номенклатура клистронов ежегодно претерпевает некоторое качественное изменение, в частности, увеличивается количество типов мощных усилительных клистронов импульсного и непрерывного режимов и уменьшается номенклатура отражательных и генераторных клистронов малой мощности, которые постепенно заменяются твердотельными приборами СВЧ.

По оценке специалистов фирмы Frost and Sullivan (США), ожидается, что за период 1975—1980 гг. объем выпуска американской электронной промышленностью пролетных усилительных клистронов увеличится на 31%, а отражательных клистронов сократится примерно на 20% [47]. Из общего количества рекламируемых типов клистронов около 55% составляют отражательные клистроны малой и средней мощности, 37% — пролетные усилительные клистроны импульсного и непрерывного режимов и около 8% — пролетные генераторные клистроны. Однако это соотношение ежегодно меняется в сторону увеличения номенклатуры пролетных усилительных клистронов.

4.1. ИМПУЛЬСНЫЕ УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КЛИСТРОНЫ

Зарубежными фирмами рекламируется около 100 типов усилительных клистронов, предназначенных для работы в импульсном режиме [71]. Усилительные клистроны импульсного режима применяются в РЛС различного назначения и в ускорителях элементарных частиц. Эти приборы в отличие от импульсных магнетронов позволяют получить более высокие мощности в импульсе при малой скважности и большой длительности импульсов. Из всех приборов СВЧ импульсные клистроны являются самыми мощными.

Вместе с тем они обладают рядом недостатков (большие габаритные размеры и масса, высокие рабочие напряжения, требующие применения специальных мер защиты персонала от жестких рентгеновских излучений), с которыми приходится мириться ради достижения высоких энергетических показателей [31]. Дальнейшее совершенствование мощных усилительных клистронов

Таблица 4.1

**Основные параметры мощных импульсных усилительных
клистронов**

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{п}}$, МВт	K_3	$K_{\text{у}}$, дБ	$U_{\text{л}}$, кВ	m , кг
VKP8264	Varian	0,224	3	0,125	35	110	-
VA812D	"	0,4...0,45	15	0,05	40	190	680
VA812E	"	0,4...0,45	20	0,015	40	240	680
VA862A	"	0,8	1,25	0,132	47	86	360
L5081	Litton	1,3	30	0,002	45	280	320
VKL7800	Varian	1,3	10	0,007	37	170	320
TV2023	Thomson—CSF	1,2...1,4	40	0,001	50	300	110
8840	ITT	2,856	28	0,001	53	270	67
VA820	Varian	2,8...2,9	8	0,001	47	160	30
K390	Englich Electric V.	2,998	8	0,0015	42	205	34
PT1001	EMI—Varian	2,7...3,3	6	0,004	47	180	254
VA8745	Varian	9,0...9,6	0,123	0,006	54	43	165
VKU7763	"	15,0...18,0	0,001	0,5	42	8	-

импульсного режима проводится в направлениях повышения мощности, расширения полосы пропускания, а также снижения массы и уменьшения их габаритов.

Современный технический уровень этих приборов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Импульсные усилительные клистроны выпускаются для работы на отдельных участках частот в диапазоне 0,22...18 ГГц. Наибольшее количество типов этих клистронов (до 85%) имеют рабочие частоты до 3 ГГц [71]. Максимальная импульсная мощность этих приборов в зависимости от частоты находится в пределах 1 кВт...60 МВт (см. рис. 4.3). Параметры отдельных типов мощных усилительных клистронов импульсного режима приведены в табл. 4.1. Среди клистронов дециметрового диапазона особого внимания заслуживает сверхмощный клистрон типа VKP8264, работающий на $f=224$ МГц с $P_{\text{п}}=3$ МВт, $P_{\text{ср}}=375$ кВт, $\eta=40\%$ и $\tau=1000$ мкс [87].

Наибольшую импульсную мощность имеют клистроны, специально разработанные для Стенфордского линейного ускорителя. Один из этих клистронов на $f=2,856$ ГГц при напряжении луча $U_{\text{л}}=270$ кВ обеспечивает $P_{\text{п}}=39$ МВт, а при $U_{\text{л}}=300$ кВ — 48 МВт. Самый высокий КПД этого клистронов, равный 52%, получен при $U_{\text{л}}=260$ кВ. Фирмой EMI—Varian для указанных целей разработан экспериментальный образец клистро-

на на этот же диапазон частот с выходной мощностью в импульсе 60 МВт [167]. Это является в настоящее время наивысшим достижением.

Перестройка частоты. Мощные импульсные клистроны выпускаются для работы как на фиксированных частотах, так и с перестройкой рабочей частоты в некоторых пределах. Перестройка частоты осуществляется механическим способом в результате изменения собственной частоты резонаторов. Диапазон механической перестройки частоты обычно 3...15%. Наибольшие значения относятся преимущественно к клистроном с $P_{н} < 1$ МВт.

Перестройка частоты многорезонаторных усилительных клистронов в эксплуатационных условиях представляет сложную техническую задачу. От согласованности настройки резонаторов зависят многие параметры клистронов, в том числе коэффициент усиления, КПД и полоса пропускания. Поэтому настройка клистронов на необходимую частоту чаще всего производится в заводских условиях по требованию заказчика.

Полоса пропускания. Многорезонаторные усилительные клистроны в зависимости от конструкции резонаторов и системы их настройки делятся на узкополосные и широкополосные. Узкополосные клистроны имеют полосу пропускания около 1% и характеризуются высокими коэффициентами усиления в пересчете на один резонатор. Это достигается при настройке всех резонаторов на одну частоту. Только отдельные мощные импульсные клистроны обладают полосой пропускания 10...12%. При этом они имеют меньшие значения усиления на один резонатор. Потери усиления связаны с тем, что для расширения полосы пропускания отдельные резонаторы клистронов настраиваются на частоты, отличающиеся от номинальной рабочей частоты клистронов. Примерами наиболее широкополосных приборов этого типа могут служить клистроны VA812C фирмы Varian и TV2091 фирмы Thomson—Varian [70].

Пятирезонаторные клистроны VA812C на $f \approx 0,4$ ГГц имеют полосу пропускания $\Delta f = 12\%$ и обеспечивают в этой полосе $K_{\nu} = 30$ дБ и $P_{н} = 10$ МВт. Эти клистроны работают при $U_{н} = 155$ кВ, $\tau = 6$ мкс, $P_{ср} = 30$ кВт и $\eta = 40\%$. Семирезонаторные клистроны TV2091 на $f = 3$ ГГц с $\Delta f = 10\%$ обеспечивают $K_{\nu} = 50$ дБ при $P_{н} = 30$ МВт, $P_{ср} = 30$ кВт, $\tau = 6$ мкс и $\eta = 30\%$. Фирмой Thomson—CSF разработаны клистроны на $f \approx 3$ ГГц, со-

держашие 11 резонаторов. Полоса пропускания этих клистронов составляет 10%, $K_y=50$ дБ, $P_{\text{и}}=200$ кВт и $\eta=30\%$ [168]. Более широкую полосу пропускания обеспечивают гибридные приборы — твистроны (см. § 6.1).

Усиление. Коэффициент усиления мощных импульсных клистронов зависит от числа резонаторов и полосы пропускания клистронов и находится в пределах 25...65 дБ. Среднее значение усиления, приходящееся на один резонатор, для узкополосных клистронов составляет 10...15 дБ, а для широкополосных 7...10 дБ [70]. В качестве примеров приборов с большим усилением можно привести клистроны типов RT1010 фирмы EMI—Varian и VA9326 фирмы Varian.

Четырехрезонаторные клистроны RT1010 на $f=3...3,5$ ГГц с $P_{\text{и}}=2,5$ кВт при $K_s=0,01$ имеют $K_y=65$ дБ. Они работают при $U_{\text{л}}=12,5$ кВ и $I_{\text{л}}=0,8$ А с механической перестройкой частоты в указанном диапазоне. Масса клистронов около 5 кг. Пятирезонаторные клистроны VA9326 на $f=9...10,6$ ГГц с $P_{\text{и}}=1,5$ кВт при $K_s=0,03$ имеют $K_y=60$ дБ. Эти клистроны работают при $U_{\text{л}}=9$ кВ, $I_{\text{л}}=0,7$ А также с механической перестройкой частоты. Их $m=4,1$ кг. В развитии мощных усилительных клистронов проявляется тенденция к увеличению числа резонаторов.

Длительность импульсов. Мощные импульсные клистроны в отличие от приборов магнетронного типа позволяют работать при очень больших длительностях импульсов. Известно много серийных типов клистронов (например, VA826A и VA926 фирмы Varian [70] и сверхмощный клистрон типа VKP8264), обеспечивающих работу при $\tau=1000$ мкс и более. Фирмой Varian много лет выпускается четырехрезонаторный клистрон 4KMV150LH-1 на $f=0,714$ ГГц с $P_{\text{и}}=200$ кВт, $P_{\text{ср}}=50$ кВт, работающий при $\tau=10000$ мкс, $U_{\text{л}}=40$ кВ, $I_{\text{л}}=14,8$ А и жидкостном охлаждении. Его $K_y=40$ дБ и $m=113$ кг [70]. Минимальные значения длительности импульсов составляют 1 мкс.

КПД в мощных импульсных клистронов $\eta=30...60\%$. Примерами клистронов с высоким КПД могут служить следующие приборы.

Фирмой General Electric с помощью математического моделирования на серии узкополосных клистронов M6813 на $f\approx 3$ ГГц и $P_{\text{и}}=1$ МВт показана возможность повышения КПД до 64%. Экспериментально получен

$\eta=62\%$ [156]. Калифорнийским университетом совместно с фирмой Litton разработан шестирезонаторный клистрон с $P_{и}=1,25$ МВт на $f=0,8$ ГГц, максимальный КПД которого равен $57,4\%$. Высокие значения КПД получены в результате настройки четвертого резонатора на вторую гармонику при соответствующем выборе размеров длины труб дрейфа и зазоров между ними [156].

Большие КПД получены также на клистродах с меньшей выходной мощностью. Например, $\eta=49\%$ у клистронов L5195 фирмы Litton, имеющих $P_{и}=80$ кВт на $f \approx 4$ ГГц [155]. Зарубежными фирмами проводятся широкие исследования, направленные на увеличение КПД мощных импульсных клистронов. В частности, фирмой Varian исследуется возможность повышения КПД до 90% у клистронов с $P_{и}=50$ кВт [179]. При этом решается задача увеличения долговечности этих клистронов до 20...40 лет.

Габариты и масса. Наибольшие размеры являются характерными для мощных клистронов дециметрового диапазона, а наименьшие — для клистронов сантиметрового диапазона с умеренной импульсной мощностью.

В качестве примеров приборов с большими размерами и массой можно привести мощные клистроны типов L3775 фирмы Litton и X6410 фирмы Varian на $f \approx 0,43$ ГГц с электромагнитной фокусировкой. Клистроны L3775 с $P_{и}=30$ МВт при $\tau=15$ мкс и $P_{ср}=30$ кВт имеют длину 3,6 м и $m=1000$ кг. Клистроны типа X6410 с $P_{и}=2,5$ МВт имеют $m \approx 1250$ кг [71].

Переход от электромагнитной фокусировки к применению постоянных магнитов в клистродах дециметрового диапазона не приводит к заметному уменьшению массы и габаритов этих приборов. Хотя это позволяет исключить применение источника питания электромагнитов, а следовательно, сократить габариты и массу передающего устройства в целом. Масса постоянных магнитов остается почти такой же, как и масса электромагнитов (соленоидов). Например, в упоминавшихся выше импульсных клистродах для линейных ускорителей с $P_{и}=24$ МВт на $f=2,8$ ГГц масса фокусирующего постоянного магнита 363 кг [164].

В импульсных клистродах сантиметрового диапазона с умеренной импульсной мощностью для фокусировки электронных пучков применяются постоянные магниты или периодические фокусирующие системы на постоян-

Таблица 4.2

Сравнительная оценка импульсных клистронов с различными способами фокусировки электронного луча

Параметр	Тип клистрона	
	VA874	VKX7752A
Способ фокусировки	Постоянный магнит	МПФС
Длина волны, см	3	3
Мощность импульсная, кВт	100	120
Мощность средняя, Вт	250	500
Полоса по уровню 1 дБ, МГц	40	200
Общая масса, кг	16,3	3,6

ных магнитах (МПФС). Применение МПФС позволяет значительно сократить массу клистронов. Это наглядно видно, например, из сравнения параметров клистронов фирмы Varian с фокусировкой постоянными магнитами и МПФС, приведенных в табл. 4.2. Применение МПФС обеспечивает не только сокращение массы клистронов, но и улучшение их параметров, в том числе повышение средней мощности и расширение полосы пропускания [165]. Еще более значительное сокращение массы и поперечных размеров клистронов достигается с помощью электростатической фокусировки (см. рис. 4.10). Значительный выигрыш в массе приборов наблюдается у клистронов дециметрового диапазона с большой импульсной мощностью. Примеры отдельных типов мощных импульсных клистронов с электростатической фокусировкой и жидкостным охлаждением, выпускаемых фирмой Varian, приведены в табл. 4.3. Сравнивая данные, при-

Таблица 4.3

Мощные импульсные клистроны с электростатической фокусировкой

Параметр	Тип прибора			
	VA87C	VA820C	VA816J	8956
Диапазон частот, ГГц	2,8...2,9	2,8...2,9	3,4...3,6	5,4...5,9
Импульсная мощность, МВт	2	8	2,7	3,3
Коэффициент заполнения	0,001	0,002	0,0036	0,002
Коэффициент усиления, дБ	60	47	42	30
Анодное напряжение, кВ	120	140	125	135
Ток луча, А	32	115	100	111
Масса, кг	30	30	39	64

веденные в этой таблице, с характеристиками аналогичных по частоте и мощности клистронов с электромагнитной фокусировкой, можно отметить, что применение электростатической фокусировки обеспечивает сокращение массы клистронов в 5 ... 7 раз.

Однако максимальная импульсная мощность клистронов с электростатической фокусировкой ограничивается электрической прочностью элементов фокусирующей системы [165]. С увеличением частоты, а следовательно с уменьшением геометрических размеров

электрическая прочность элементов фокусирующей системы снижается. Предельная импульсная мощность для этих клистронов составляет 10 МВт на $f=1$ ГГц, 1 МВт на $f=3$ ГГц и 100 кВт на $f=6$ ГГц [155]. Наряду с указанными системами фокусировки в отдельных клистронах применяются комбинированные системы, включающие электростатическую (вблизи электронной пушки) и магнитную (у коллектора) фокусировки.

Характерный для современных мощных импульсных клистронов пример конструктивного оформления показан на рис. 4.6. На рис. 4.6 показан внешний вид мощного импульсного клистрона TV2014, выпускаемого фирмой Thomson—Varian для использования в линейных ускорителях. Этот клистрон на $f=2,7...3,1$ ГГц обеспечивает $P_{дл}=25$ МВт при $\tau=10$ мкс и $P_{ср}=30$ кВт, $K_{\nu}=50$ дБ в полосе 15 МГц и $\eta=40\%$. Он работает при $U_{дл}=250$ кВ и $I_{дл}=250$ А в импульсе.

Долговечность мощных импульсных клистронов значительно выше долговечности приборов магнетронного типа и ЛБВО. Срок службы мощных клистронов для линейных ускорителей составляет 5...6 лет [41]. Это, в частности, относится к клистронам TV2011, TV2012,

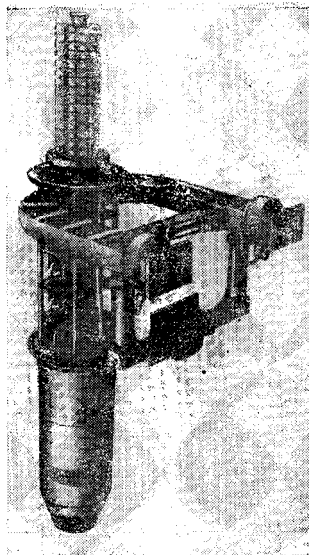


Рис. 4.6. Импульсный усилительный клистрон типа TV2014 для линейных ускорителей

TV2014 и TV2019, выпускаемым фирмой Thomson—Varian. Мощные импульсные клистроны, используемые в РЛС, имеют средний срок службы более 3,5 тыс. ч, а максимальный — до 40 тыс. ч. Например, клистрон VA842 фирмы Varian с $P_{\text{н}}=1,25$ МВт на $f=0,4\dots\dots 0,45$ ГГц обладает средним сроком службы около 7 тыс. ч, а максимальным — 40 тыс. ч.

4.2. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КЛИСТРОНЫ НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА

За рубежом выпускается более 300 типов усилительных клистронов, предназначенных для работы в непрерывном режиме [71]. Усилительные клистроны непрерывного режима получили широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре тропосферной, радиорелейной и спутниковой связи, телевизионных передатчиках, бортовых и наземных РЛС, а также в установках СВЧ нагрева в промышленности и передачи энергии по волноводам и свободному пространству. Эти приборы в отличие от магнетронов позволяют получать более высокую выходную мощность благодаря тому, что они имеют наиболее развитую электронную пушку, увеличенные размеры области формирования и взаимодействия электронного луча и рациональные с точки зрения рассеяния тепла форму и размеры коллектора. Клистроны непрерывного режима, так же как и другие мощные приборы СВЧ, постоянно совершенствуются, и их номенклатура ежегодно пополняется новыми типами.

Современный технический уровень этих приборов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Клистроны непрерывного режима выпускаются на $f=0,22\dots 36$ ГГц. Наибольшее количество типов приборов предназначено для работы на частотах менее 1 ГГц. Выходная мощность этих приборов находится в пределах от нескольких ватт до 1 МВт (см. рис. 4.3). Максимальная выходная мощность на частотах до 1 ГГц достигает 250 кВт на $f=8$ ГГц — 1 МВт и на $f=33$ ГГц — 10 кВт.

Среди наиболее мощных приборов целесообразно отметить многорезонаторные усилительные клистроны X3075, X3030 и VA92BA, выпускаемые фирмой Varian [70].

Клистрон X3075 (семирезонаторный) на $f=2,1$ ГГц имеет $P_{\text{вых}}=500$ кВт и $K_{\text{ч}}=58$ дБ. Он работает при

$U_{\text{л}}=64$ кВ и $I_{\text{л}}=15$ А. Клистрон Х3030 (четырёхрезонаторный) на $f=8$ ГГц при $U_{\text{л}}=110$ кВ и $I_{\text{л}}=9,6$ А обеспечивает $P_{\text{вых}}=250$ кВт и $K_{\text{у}}=40$ дБ. На этом клистроне достигнута мощность 1 МВт, что является рекордом для клистронов непрерывного режима [160].

Клистрон VA92BA (пятирезонаторный) на $f=33$ ГГц при $U_{\text{л}}=12$ кВ и $I_{\text{л}}=1$ А имеет $P_{\text{вых}}=10$ кВт и $K_{\text{у}}=50$ дБ. Этот клистрон является самым мощным среди всех приборов миллиметрового диапазона волн, работающих в непрерывном режиме.

Перестройка частоты. Усилительные клистроны в зависимости от их назначения выпускаются для работы на фиксированных частотах или с механической перестройкой частоты в заданных пределах. Перестройка резонаторов осуществляется различными способами, в том числе посредством пластической деформации гибкой стенки резонатора, введением в резонатор подвижного емкостного элемента и перемещением подвижной стенки резонатора, находящейся в вакууме или в съемной вневакуумной части резонатора. Наибольшие пределы механической перестройки частоты достигаются перемещением подвижной стенки резонатора и введением в резонатор емкостного элемента. Диапазон механической перестройки частоты современных многорезонаторных усилительных клистронов обычно составляет 10... 20% от номинальной частоты.

Обеспечение одновременной перестройки всех резонаторов многорезонаторного клистрона является сложной технической задачей, которая была решена только в последнее время. Примером положительного решения этой задачи служат клистроны VA384D и VKC7777B, разработанные фирмой Varian для аппаратуры связи со спутниками [70, 165]. В этих клистронах обеспечивается кнопочная перестройка на любой из 10...12 каналов на $f=5,9...6,4$ ГГц. Они снабжены специальными устройствами для перестройки каналов.

Коэффициент усиления. Многорезонаторные усилительные клистроны позволяют получать устойчивое усиление до 100 дБ. Дальнейшее увеличение $K_{\text{у}}$ ограничивается потоком вторичных электронов от коллектора, который переносит часть СВЧ энергии из выходного резонатора во входной и приводит к самовозбуждению. Однако возможности получения максимального усиления в промышленных образцах клистронов практически не

Таблица 4.4

Параметры клистрона 4658 при работе в различных режимах

Параметр	Режим		
	высокого КПД	большого усиления	широкой полосы пропускания
Выходная мощность, кВт	1,45	1,3	1,35
Коэффициент усиления, дБ	44	61	41
Полоса на уровне 3 дБ, МГц	8	6	13
КПД, %	39	35	36

используются потому, что для получения максимальной выходной мощности, увеличения КПД и полосы пропускания применяются специальные способы настройки резонаторов, снижающие общее усиление клистрона.

Зависимость коэффициента усиления от других параметров клистрона можно проследить на примере клистрона 4658, выпускаемого фирмой RCA для применения в станциях тропосферной связи и РЛС. Этот клистрон, предназначенный для работы на $f=4,4 \dots 5,0$ ГГц, может использоваться в любом из трех режимов — высокого КПД, большого усиления или широкой полосы пропускания. Типовые значения основных параметров клистрона 4658 на частоте 4,4 ГГц в указанных режимах приведены в табл. 4.4. Как видно из таблицы, достижение более высоких значений выходной мощности, КПД и полосы пропускания приводит к уменьшению усиления на 17...20 дБ.

Коэффициент усиления зарубежных усилительных клистронов в зависимости от числа используемых резонаторов обычно лежит в пределах 25...60 дБ. Причем трехрезонаторные клистроны имеют усиление 25...35 дБ, четырехрезонаторные — 35...45 дБ, пятирезонаторные — 45...55 дБ. Клистроны с числом резонаторов, равным 6 и более, имеют усиление до 60 дБ. Среди приборов с большим коэффициентом усиления целесообразно отметить семirezонаторные клистроны X3070 и X3075 фирмы Varian, которые при $P_{\text{вых}}=450$ и 500 кВт имеют $K_{\text{у}}=57$ и 58 дБ соответственно [70].

Полоса пропускания. Многорезонаторные клистроны в принципе являются узкополосными усилителями. Полоса пропускания у наиболее широкополосных, как прави-

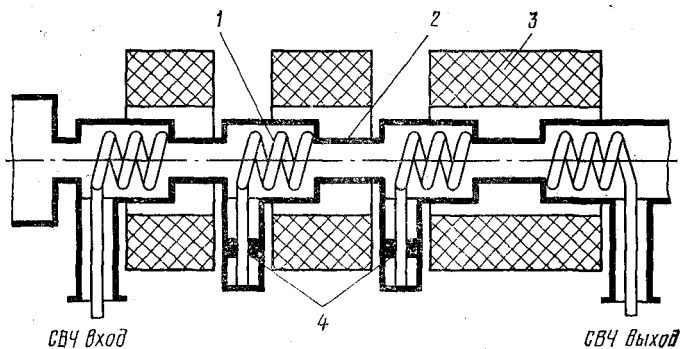


Рис. 4.7. Принцип устройства колебательной системы клистронов с длительным распределенным взаимодействием:

1 — отрезок спирали; 2 — труба дрейфа; 3 — фокусирующий соленоид; 4 — поршень настройки

ло, самых мощных клистронов непрерывного режима достигает всего 1...2% от номинальной частоты. Расширение полосы пропускания обычных усилительных клистронов, как показано в табл. 4.4, приводит к значительному сокращению их усиления, а также к уменьшению КПД и выходной мощности. Поэтому зарубежными фирмами изыскиваются новые более эффективные технические решения по повышению широкополосности этих приборов.

Среди известных решений можно отметить, например, применение дополнительного фильтра-резонатора, включаемого после выходного резонатора клистронов, и использование в клистронов более широкополосных колебательных систем. Эффективность этих мер можно проследить на следующих примерах. Применение дополнительного фильтра-резонатора в разработанном фирмой Varian клистроне VKX7799 для наземных станций систем связи через спутники на $f=7,9...8,4$ ГГц позволило расширить его полосу пропускания до 125 МГц ($\sim 1,5\%$).

Фирмой Siemens рекламируются клистроны UK1170 и UK1180 дециметрового диапазона с распределенным взаимодействием, созданные для телевизионных передатчиков. Отличительной особенностью этих приборов является применение вместо объемных резонаторов отрезков спиральных линий, разделенных трубами дрейфа. Устройство колебательной системы такого прибора схе-

матически показано на рис. 4.7. Каждая спираль заменяет один резонатор обычного клистрона. Настройка спиралей на рабочую частоту осуществляется перемещением короткозамыкающего поршня в отрезке коаксиальной линии, подключенной к одному из концов спирали. По мнению специалистов этой фирмы, разработанные усилительные клистроны с распределенным взаимодействием обладают рядом преимуществ перед обычными клистронами. Они имеют более высокое значение произведения усиления на полосу пропускания, большой диапазон механической перестройки частоты, повышенный электронный КПД и меньшее напряжение электронного луча [157].

КПД. У большинства промышленных типов усилительных клистронов непрерывного режима электронный $\eta=35\dots 40\%$. Вместе с тем на отдельных типах этих приборов получены рекордные значения электронного $\eta=70\dots 74\%$ (см. рис. 4.4). Повышение КПД мощных пролетных клистронов на протяжении многих лет было и остается одной из важнейших проблемных задач дальнейшего совершенствования приборов этого класса. В результате комплексного подхода к решению этой проблемы и применения машинных методов проектирования получены известные успехи, вселяющие уверенность в возможность создания широкой номенклатуры промышленных типов клистронов с электронным $\eta=60\dots 65\%$.

Эффективными способами повышения КПД много-резонаторных клистронов, предложенными специалистами фирмы Varian, оказались настройка одного или двух резонаторов на удвоенную частоту и увеличение длины трубы дрейфа для использования второй гармоники пространственного заряда.

Указанные способы были, в частности, реализованы в разработках фирмой EMI—Varian усилительных клистронов X3074, VKS7773 и VKC7790. Параметры этих приборов приведены в табл. 4.5 и 4.8. В узкополосном клистроне X3074 электронный $\eta=70\%$ получен в основном в результате настройки одного из резонаторов на удвоенную частоту. Еще более эффективной оказалась настройка на удвоенную частоту двух резонаторов, осуществленная в клистроне VKS7773. Полученное при этом $\eta=74\%$ является самым высоким для всех пролетных усилительных клистронов [169].

Однако применение указанных способов настройки резонаторов на удвоенную частоту вызвало и некоторые нежелательные эффекты, например: сокращение рабочей полосы частот клистрона, уменьшение диаметра луча, повышение плотности тока катода и связанное с этим увеличение магнитного поля, а следовательно, и увеличение мощности питания фокусирующих электромагнитов.

Наиболее перспективным считается использование для повышения КПД второй гармоники сил пространственного заряда в сгруппированном электронном потоке. Этот способ реализован в клистроне ВКС7790, электронный КПД которого при этом удалось повысить до 57... 59%. Хотя этот способ лишен указанных выше недостатков, его реализация требует значительного (до 40%) увеличения длины трубы дрейфа в последних каскадах клистрона.

К возрастанию КПД многорезонаторных клистронов приводит также плавное (ступенчатое) снижение потенциала коллектора. Применение секционированных коллекторов дает значительный эффект для клистронов с небольшим КПД. При $\eta=40 \dots 60\%$ введение рекуперации позволяет повысить электронный КПД клистронов всего на несколько процентов. Исследования, проведенные на клистроне Z5061 с $P_{\text{вых}}=1$ кВт на $f=750$ МГц, показали, что применение 10-ступенчатого коллектора с рекуперацией обеспечивает повышение КПД с 54 до 70% [161].

Габариты и масса. Большие размеры имеют мощные клистроны дециметрового диапазона волн. Например, клистрон V75SK на $f=0,5$ ГГц и $P_{\text{вых}}=600$ кВт имеет длину 3,6 м и массу 380 кг без учета внешней фокусирующей системы [71]. Для большинства клистронов их размеры и масса в значительной мере определяются применяемой системой фокусировки электронов. Наиболее распространенной фокусирующей системой являются электромагниты (соленоиды), обмотки которых обычно выполняются из алюминиевой или медной фольги. Для фокусировки электронного луча в клистролах дециметрового диапазона требуется магнитное поле напряженностью 2...3 тыс. Гс, а для клистронов сантиметрового диапазона — до 10 тыс. Гс.

В связи с большой длиной электронного луча и высокими значениями напряженности магнитного поля, не-

обходимого для его фокусировки, размеры и масса электромагнитов во многих случаях больше размера и массы самого клистрона. Например, для усилительного клистрона дециметрового диапазона с $P_{\text{вых}}=50$ кВт, имеющего длину 1,8 м и массу 90 кг, необходим электромагнит с $m=270$ кг.

Применение фокусирующих систем на основе постоянных магнитов, хотя и исключает затраты мощности на питание и охлаждение электромагнитов, однако при прочих равных условиях увеличивает массу фокусирующей системы не менее чем в 2 раза. Поскольку масса магнитов растет пропорционально третьей степени длины электронного луча, фокусировка очень длинных электронных потоков однородным магнитным полем становится практически нецелесообразной. Фокусирующие системы на постоянных магнитах применяются только для клистронов коротковолновой части сантиметрового диапазона, имеющих к тому же небольшое число резонаторов.

Над проблемой создания компактных, легких, экономичных и надежных фокусирующих систем для многорезонаторных клистронов работают многие зарубежные фирмы более 10 лет. Лишь в последние годы появилась возможность создания усилительных клистронов с относительно легкими фокусирующими системами. Фирмой Varian для клистронов со сходящейся оптикой разработана облегченная фокусирующая система с применением двух магнитных колец из сплава самарий — кобальт. Устройство такой системы схематически показано на рис. 4.8. Указанная конструкция позволяет без нарушения качества фокусировки электронного луча

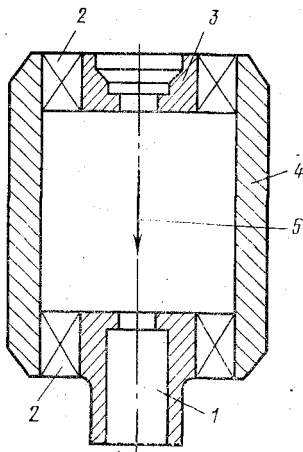


Рис. 4.8. Принцип устройства фокусирующей системы на основе самарий-кобальтовых магнитов с радиальной намагниченностью:

1 — полюсный наконечник со стороны электронной пушки; 2 — кольцевой магнит из сплава самарий — кобальт; 3 — полюсный наконечник со стороны коллектора; 4 — магнитопровод из мягкого железа; 5 — направление магнитного поля

пропускать через прорези в магнитопроводе волноводные выводы и элементы настройки резонаторов клистрона. Масса такой фокусирующей системы в 2...3 раза меньше общей массы самих клистронов.

Применение самарий-кобальтовых магнитов обеспечивает 10-кратную экономию массы фокусирующей системы [166]. Однако широкое применение таких систем сдерживается высокой стоимостью этого сплава и невозможностью изготовления из него магнитов больших размеров.

Перспективными с точки зрения обеспечения минимальных габаритов и массы клистронов являются периодические системы из электростатических и магнитных линз.

Схематическое изображение колебательной системы клистрона с электростатической фокусировкой показано на рис. 4.9. Эти клистроны способны работать в широких пределах изменения выходной мощности. Отрицательный потенциал фокусирующих электродов относительно электронного пучка позволяет вытягивать из него положительные ионы, предотвращая ионную бомбардировку катода и возникновение релаксационных колебаний. Максимальная мощность и ширина полосы пропускания у клистронов с электростатической фокусировкой несколько меньше, чем у клистронов с магнитной фокусирующей системой.

Зарубежными фирмами создано несколько новых типов клистронов с электростатической фокусировкой. Например, фирмой Litton для портативных станций тропосферной связи разработан клистрон L5182, который весит в 4 раза меньше, чем аналогичный клистрон с постоянными фокусирующими магнитами [155]. При $P_{\text{вых}}=1$ кВт на $f=4,4 \dots 5,0$ ГГц его $m=4,75$ кг. Наиболее перспективным считается применение магнитных

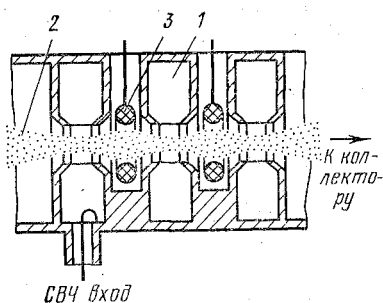


Рис. 4.9. Принцип устройства электростатической фокусирующей системы пролетного усилительного клистрона:

1 — резонатор; 2 — электронный луч;
3 — кольцевой фокусирующий электрод

периодических фокусирующих систем. Создание этих систем фокусировки открывает возможность значительного сокращения общих габаритных размеров и массы мощных многорезонаторных клистронов дециметрового диапазона.

Долговечность. Усилительные клистроны непрерывного режима обладают более высокой долговечностью, чем приборы магнетронного типа. Это достигается благодаря некоторым конструктивным и технологическим мероприятиям. Среди них можно отметить следующие:

- использование в клистронах довольно развитых катодов со сходящейся оптикой и применение для управления электронным лучом двойных и теневых сеток. Отбор тока от применяемых в клистронах оксидных катодов обычно не превышает $0,3 \text{ А/см}^2$, а от импрегнированных катодов — 5 А/см^2 ;

- создание и поддержание внутри клистрона высокой степени вакуума. Рабочий вакуум, как правило, составляет $1,3 \cdot 10^{-6}$ Па. Во многих мощных клистронах для поддержания высокого вакуума в эксплуатации используются встроенные ионные насосы;

- создание рациональных и эффективных систем охлаждения клистронов. В зависимости от выходной мощности применяются различные системы охлаждения: естественное (для приборов мощностью до $100 \dots 300 \text{ Вт}$), принудительное воздушное (до нескольких киловатт) и жидкостное (для мощных приборов);

- применение защитных схем и устройств, предохраняющих клистрон от выхода из строя во время эксплуатации. Эти схемы и устройства не допускают, например, увеличения тока, оседающего на резонаторы, изменения режима охлаждения, увеличения КСВ нагрузки, развития СВЧ дуги в выводе энергии и т. д.

Клистроны дециметрового и сантиметрового диапазонов, выпускаемые зарубежными фирмами, имеют гарантируемый срок службы до 5 тыс. ч и средний срок службы до 50 тыс. ч. Клистроны TH2054 фирмы Thomson — CSF для СВЧ нагрева имеют гарантируемый срок службы 5 тыс. ч. Средний срок службы телевизионных клистронов 3K5000LF фирмы Varian достигает 50 тыс. ч. Клистроны миллиметрового диапазона имеют гарантируемый срок службы до 1 тыс. ч [170].

В табл. 4.5 приведены основные параметры отдельных типов усилительных клистронов, разработанных и выпу-

Таблица 4.5

Основные параметры усилительных клистронов для тропосферной и спутниковой связи

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, кВт	$K_{\text{у}}$, дБ	Δf , МГц	η , %	m , кг
4KM50LB	Varian	0,35...0,47	10	54	—	37	390
F2055	Thomson — CSF	0,5	250	37	5	40	800
5KM30051	Varian	2,1...2,4	100	55	—	—	190
5KM1000SG	•	2,3...2,4	450	55	—	50	480
L5182	Litton	4,4...5,0	1*	45	—	—	4,6
F2006	Thomson — CSF	4,4...5,0	1,2	45	11	30	30
VA908	Varian	4,4...5,0	10	57	—	33	9 ²⁾
VKC7790	•	4,4...5,0	12	—	16	59	—
VA884D	•	5,9...6,4 ¹⁾	14	52	75	36	9 ²⁾
4658	RCA	4,4...5,0	1,45	44	125	39	17
VA879	Varian	7,1...8,1	100	43	30	46	—
X3030	•	8	250	35	40	50	—

¹⁾ С механической перестройкой на 10 заранее выбранных частот.

²⁾ Без учета массы электромагнитной фокусирующей системы.

скаемых зарубежными фирмами для применения в радиоэлектронной аппаратуре тропосферной и спутниковой связи. Кроме клистронов, параметры которых приведены в табл. 4.5, также представляют интерес недавно разработанные фирмой Varian пятирезонаторные усилительные клистроны непрерывного режима в миллиметровом диапазоне волн типа VA928A. Они на $f=30...36$ ГГц имеют $P_{\text{вых}}=1$ кВт и обеспечивают при $U_{\text{л}}=12$ кВ и $I_{\text{л}}=1$ А $K_{\text{у}}=50$ дБ в полосе 30 МГц. Масса этих клистронов вместе с фокусирующими постоянными магнитами 36 кг.

В этом же диапазоне частот японской фирмой Nippon Electron создан для систем связи со спутниками шестирезонаторный усилительный клистрон, который на $f=30$ ГГц при $U_{\text{л}}=10$ кВ и $I_{\text{л}}=0,5$ А обеспечивает $P_{\text{вых}}=300$ Вт при $K_{\text{у}}=38$ дБ. Отличительными особенностями этого клистрона являются широкая полоса пропускания (200 МГц) и применение фокусирующей системы на основе самарий-кобальтовых магнитов. Этой же фирмой создан еще один тип клистронов для выходных каскадов подвижных широкополосных систем связи со спутниками на $f=14...14,5$ ГГц. Он представляет собой пятирезонаторный усилительный клистрон с высоким КПД, малой массой, $P_{\text{вых}}=2$ кВт и $K_{\text{у}}=43$ дБ. Клистрон работает при $U_{\text{л}}=9,8$ кВ и $I_{\text{л}}=0,78$ А [177].

В последнее время отмечается повышенный интерес к применению систем тропосферной связи. Для этих систем обычно используются широкополосные передатчики дециметрового и сантиметрового диапазонов с $P_{\text{вых}} = 1 \dots 10$ кВт. Причем при их разработке предпочтение отдается клистронам, обладающим большой мощностью, широкой полосой пропускания и высокой надежностью. Фирма Thomson—CSF специально создала для этих целей серию из шести малогабаритных многорезонаторных усилительных клистронов с $P_{\text{вых}} = 1$ кВт при КПД не менее 30%. Все эти приборы имеют фокусирующую систему из постоянных магнитов и систему охлаждения сжатым воздухом [178]. Одним из приборов этой серии является клистрон типа TH2404 на $f = 2,4 \dots 2,7$ ГГц с $P_{\text{вых}} = 1$ кВт. Этот клистрон обеспечивает $K_{\gamma} = 40$ дБ в мгновенной полосе 10 МГц и имеет электронный КПД $\approx 35\%$. Указанные мощности и полосы пропускания являются достаточными для передачи информации по 120 каналам связи [178].

Пример конструктивного выполнения клистронов, применяемых в аппаратуре связи, приведен на рис. 4.10.

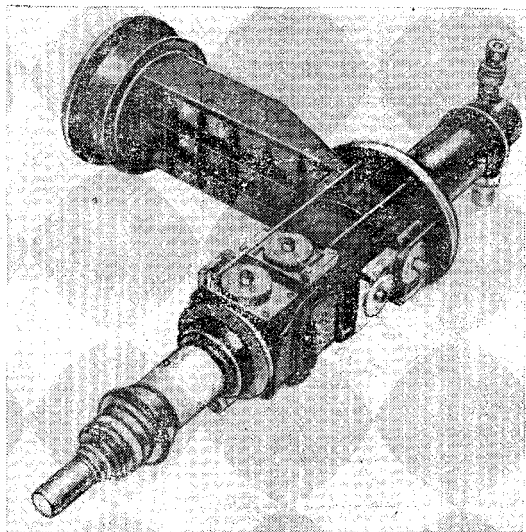


Рис. 4.10. Усилительный клистрон непрерывного режима типа VA800 для аппаратуры связи

На этом рисунке показан внешний вид четырехрезонаторного усилительного клистрона VA800 с механической перестройкой частоты, жидкостным и принудительным воздушным охлаждением. Фокусировка электронного луча осуществляется с помощью внешнего электромагнита. Этот клистрон на $f=1,7 \dots 2,4$ ГГц имеет $P_{\text{вых}}=10$ кВт при электронном $\eta=40\%$ и $K_{\gamma}=50$ дБ. Он работает при $U_{\text{л}}=15$ кВ.

В табл. 4.6 приведены основные параметры отдельных типов усилительных клистронов, предназначенных для использования в телевизионных передатчиках. Эти клистроны работают исключительно в дециметровом диапазоне, имеют $P_{\text{вых}}=10 \dots 55$ кВт и $K_{\gamma}=40 \dots 45$ дБ. Для фокусировки электронного луча используются электромагниты. Охлаждение преимущественно жидкостное. В ряде случаев применяются замкнутые испарительные системы охлаждения. Эти клистроны в связи с перечисленными особенностями имеют довольно большие габариты и массу.

Кроме указанных в табл. 4.6, представляют интерес и другие клистроны, разработанные в последнее время [167]. Например, фирмой Varian рекламируются клистроны VA953H и VA954H на $f=0,47 \dots 0,698$ ГГц, $P_{\text{вых}}=55$ кВт, $K_{\gamma}=47$ дБ, с полосой пропускания 7 МГц и электронным КПД=42%. Отличительной особенностью этих приборов является высокий коэффициент усиления.

Таблица 4.6

Основные параметры усилительных клистронов для телевизионных передатчиков

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, кВт	K_{γ} , дБ	$U_{\text{л}}$, кВ	$I_{\text{л}}$, А	η , %	m , кг
VA946A/B F2008	Varian	0,47...0,56	25	46	21	6,2	32	110
	Thomson— CSF	0,47...0,64	30	40	13	4,0	41	460
KAP1151 TH2063	То же	0,47...0,64	55	46	24	6,0	41	430
	"	0,57...0,70	10	42	12	2,1	41	90
K376	English Electric V.	0,47...0,61	25	42	20	6,0	33	54
	То же	0,47...0,61	12	40	14	3,5	27	430
IAB81	Toshiba	0,47...0,69	11	44	16	3,0	65	80
IAB83	"	0,47...0,69	33	45	21	6,0	60	110
УК1170	Siemens	0,47...0,58	23	43	15	4,0	38	—
УК1180	»	0,61...0,94	23	43	15	4,0	38	—

Таблица 4.7

Основные параметры усилительных клистронов
непрерывного режима для РЛС

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, кВт	K_{y} , дБ	$U_{\text{д}}$, кВ	$I_{\text{д}}$, А	m , кг
ТН2406	Thomson—CSF	1,7...2,4	1,0	37	6	0,55	83
ТН2404	То же	2,4...2,7	1,0	40	6,5	0,58	83
ТН2047	" "	2,8...3,05	1,0	40	6,5	0,5	83
ТН2407	" "	4,4...5,0	1,0	38	6,7	0,6	46
VKJ2450AI	Varian of Canada	5,9...6,4	1,5	37	7,5	0,87	32
LD4134A/B	Nippon Electronic	5,9...6,4	3,0	42	8,5	0,84	45
VA869A	Varian	9,5...10,6	0,5	53	6,0	0,5	—
ТН2410	Thomson—CSF	9,2...10,6	1,5	60	9,0	0,7	9,9

Этой же фирмой разработаны усилительные клистроны VKX7809 и VKU7791 для телевидения и прямой связи со спутниками на $f=11,5 \dots 12,5$ и $14 \dots 14,5$ ГГц. Они имеют соответственно $P_{\text{вых}}=2,2$ и $1,6$ кВт, $K_{\text{y}}=46$ и 44 дБ, полосу пропускания по уровню 1 дБ 65 и 85 МГц и $\eta=35$ и 30% . Клистроны работают при $U_{\text{д}}=8,5$ кВ и $I_{\text{д}} \approx 0,7$ А. Отличительной особенностью этих приборов является применение фокусирующей системы на постоянных магнитах и принудительного воздушного охлаждения. Их $m=25$ кг.

В табл. 4.7 даны основные параметры отдельных типов усилительных клистронов, предназначенных для РЛС. Эти приборы имеют сравнительно небольшую выходную мощность, механическую перестройку частоты и выпускаются в пакетированной конструкции вместе с постоянными магнитами.

Достижение высоких значений КПД выходной мощности, долговечности и снижение стоимости клистронов непрерывного режима открывают возможность более широкого применения этих приборов в промышленных установках СВЧ нагрева, в медицине и в системах передачи энергии через свободное пространство [164, 171, 172]. Основные параметры некоторых типов клистронов, используемых для СВЧ нагрева в промышленности, приведены в табл. 4.8. Как видно из этой таблицы, клистроны указанного назначения обладают очень высоким

Таблица 4.8

Усилительные клистроны непрерывного режима для СВЧ нагрева

Параметр	Тип прибора			
	X3074	X307	VKS7773	TN2054
Рабочая частота, ГГц	0,805	0,805	2,45	2,45
Выходная мощность, кВт	100	100	50	50
Напряжение луча, кВ	33	28	28	25,5
Ток луча, А	—	4,8	—	3,25
Электронный КПД, %	70	60	74	65
Коэффициент усиления, дБ	—	42	—	50
Масса прибора, кг	—	—	—	65
Масса фокусирующей системы, кг	—	—	—	215

КПД, достижение которых стало возможным благодаря использованию в их конструкции новых технических решений. Клистроны для СВЧ нагрева обладают также большой долговечностью. Например, клистрон типа TN2054 фирмы Thomson—CSF имеет гарантируемый срок службы 5 тыс. ч и средний срок службы более 15 тыс. ч [165].

Ожидается, что дальнейшее повышение КПД и долговечности клистронов непрерывного режима позволит еще больше расширить применение этих приборов в промышленности и медицине. Клистроны непрерывного режима предполагается использовать также в разрабатываемой за рубежом космической системе преобразования энергии Солнца в СВЧ энергию с передачей ее на Землю [173—175].

4.3. ГЕНЕРАТОРНЫЕ КЛИСТРОНЫ

В настоящее время зарубежными фирмами рекламируется более 200 типов генераторных клистронов непрерывного и импульсного режимов. Среди них более половины составляют клистроны с распределенным взаимодействием, принцип устройства колебательной системы которых показан на рис. 4.7. Остальные приборы являются преимущественно двухрезонаторными клистронами непрерывного режима [48, 70]. Наибольшее внимание уделяется разработке генераторных клистронов миллиметрового диапазона [47]. Так, например, среди новых клистронов, появившихся в 1976 г., 88 типов составляют

клизтроны с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона. Эти клизтроны разработаны фирмой Varian Ass. of Canada.

Генераторные клизтроны в отличие от приборов магнетронного типа средней и малой мощности обеспечивают возможность создания генераторов на весь миллиметровый диапазон. Кроме того, они обладают высокой стабильностью и надежностью работы, имеют сравнительно небольшие габариты и массу, низкий уровень АМ и ЧМ шумов и большую долговечность. Эти приборы применяются в доплеровских РЛС бокового обзора для подсветки и обнаружения целей, в передатчиках радиомаяков, аппаратуре связи, для накачки параметрических усилителей, а также в научных исследованиях при изучении плазмы, в ядерной физике, при масштабном моделировании РЛС и др.

По мере развития твердотельных СВЧ приборов применение генераторных клизтронов, вероятно, будет постепенно сокращаться. Уже сейчас имеются примеры применения для накачки параметрических усилителей твердотельных генераторов вместо генераторных клизтронов.

Технический уровень современных генераторных клизтронов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Генераторные клизтроны двухрезонаторного типа созданы на отдельные участки ча-

Таблица 4.9

Основные параметры двухрезонаторных генераторных клизтронов непрерывного режима

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	$U_{\text{л}}$, кВ	$I_{\text{л}}$, мА	m , кг
VA521	Varian	5,5...7,0	2	4	33	—
VA508	"	8,0...9,5	5	1,35	125	0,4
QKK1802	Raytheon	9,2...9,4	0,25	4	30	4,5
QKK1803	"	9,75...9,85	0,5	4,4	30	4,5
TV514B	Thomson—CSF	9,5...10,6	2	4,2	40	0,45
SOX2392	Sperry	9,5...11,0	10	4,9	40	0,45
VKU7008	Varian	12,4...18,0	10	3,5	120	0,7
VA532	"	18,0...24	4	1,3	95	0,26
SOK2925	Sperry	21,7	4	1,85	—	0,45
VA531	Varian	26,5...33	1,5	1,3	80	0,26
VA534	"	33...40	1,5	1,5	80	0,26
SOU2201	Sperry	39,5	0,25	1,5	—	0,4
VA535	Varian	40...44	1	1,4	65	—

стот в диапазоне 5...44 ГГц. Клистроны с распределенным взаимодействием созданы на миллиметровый диапазон 30...300 ГГц [176]. Выходная мощность в непрерывном режиме двухрезонаторных клистронов находится в пределах 250 мВт...10 Вт, а клистронов с распределенным взаимодействием -- 1 Вт...1 кВт. Основные параметры отдельных типов двухрезонаторных клистронов приведены в табл. 4.9.

Отдельными фирмами, например фирмой AEG—Telefunken, выпускаются трехрезонаторные клистроны непрерывного режима типов ТКХ16033 и ТКХ16035 с $P_{\text{вых}}=5$ и 24 Вт на $f=16$ ГГц [162]. В этих клистро-нах два первых резонатора связаны через стабилизирующий резонатор высокой добротности и образуют генератор, а третий резонатор работает как усилитель. Введение стабилизирующего резонатора позволило значительно снизить уровень шумов, который на 35...45 дБ ниже, чем у аналогичных по частоте и мощности двухрезонаторных клистронов. Фирмой Thomson—CSF для возбуждателей мощных усилительных клистронов с 1966 г. выпускаются трехрезонаторные клистроны F2011 и F2052 на $f \approx 3$ ГГц с механической перестройкой в пре-

Таблица 4.10

Основные параметры генераторных клистронов с распределенным взаимодействием

Тип прибора	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	Перестройка частоты, МГц		$I_{\text{д}}$, кВ	$I_{\text{д}}$, А	m , кг
			механиче- ская	электрон- ная			
VKQ2435G	30...40	500	—	—	12	1,2	14,5
VKQ2435F	30...40	1000	ф	—	12	1,2	13
VKQ2420D	30...50	75	1600	100	8,5	0,18	6,8
VKQ2434F	30...50	500	—	—	8	0,75	13
VKE2401H	50...80	20	2800	220	7,5	0,13	6,8
VKB2425F	50...80	150	—	—	10	0,23	7,7
VKB2426F	30...110	50	—	—	10	0,17	7,7
VKT2411F	110...140	5	650	50	9	0,17	7,7
VKT2438E	110...140	20	ф	—	10	0,13	7,7
VKT2440G	140...160	5	3000	—	10	0,13	9
VKT2439E	140...180	5	ф	—	10	0,12	7,7
VKY2441E	180...230	1	ф	—	10	0,1	7,7
VKY2432E	230...300	1	ф	—	10	0,1	7,7

Примечание. ф — на фиксированные частоты.

делах до 10 МГц, имеющие $P_{и}=50 \dots 60$ кВт и $P_{ср} > 50$ Вт. Эти клистроны работают при $U_{д}=40 \dots 50$ кВ с водяным охлаждением и электромагнитной фокусировкой.

Среди клистронов миллиметрового диапазона наибольшую выходную мощность (1 кВт) имеют клистроны с распределенным взаимодействием типа VKQ2435E фирмы Varian Ass. of Canada на $f=30 \dots 40$ ГГц, а наименьшую (1 Вт) — клистроны типа VKY2432E этой же фирмы на $f=230 \dots 300$ ГГц [70]. Основные параметры отдельных типов клистронов с распределенным взаимодействием в непрерывном режиме работы приведены в табл. 4.10. Указанные клистроны выпускаются фирмой Varian Ass. of Canada. Все они имеют водяное охлаждение и работают в режиме модуляции по аноду и при стандартном напряжении накала катода 6,3 В.

Наряду с этим имеется небольшое количество генераторных клистронов, предназначенных для работы в импульсном режиме. Параметры некоторых типов этих приборов приведены в табл. 4.11. Все эти клистроны разработаны и выпускаются также фирмой Varian Ass. of Canada. Они работают при $U_{д}=20 \dots 22$ кВ с водяным охлаждением. Максимальная длительность импульса $\tau=1000$ мкс, а $K_{з}=0,1 \dots 0,001$ [48, 70].

Перестройка частоты. Генераторные клистроны выпускаются для работы на фиксированных частотах, а также с механической и электронной перестройкой частоты. Механическая перестройка клистронов осуществляется в пределах 0,5...4,0% от номинальной частоты изменением собственной частоты резонаторов. Клистроны

Таблица 4.11

Основные параметры импульсных генераторных клистронов с распределенным взаимодействием

Тип прибора	f , ГГц	$P_{д}$, кВт	$K_{з}$	τ , мкс	$U_{д}$, кВ	m , кг
VKQ2422G	30...50	2	0,1	—	22	7,7
VKQ2442G	35	5	0,05	—	22	13
VKE2412G	70	10	0,005	10	21	7,8
VKB2435G	70...90	0,65	—	—	22	7,7
VKB2413G	95	10	0,005	10	20	13
VKB2423G	90...110	0,5	—	—	22	13
VKT2419G	110...140	0,2	0,08	1000	22	7,7
VKY2430E	280	0,01	0,1	1000	22	7,7

с распределенным взаимодействием наряду с механической имеют электронную перестройку, осуществляемую изменением напряжения луча. Диапазон электронной перестройки обычно составляет 0,1...0,25% от номинальной рабочей частоты. При этом крутизна электронной перестройки в среднем около 0,1 МГц/В.

КПД. Двухрезонаторные генераторные клистроны обладают небольшим КПД, который в зависимости от выходной мощности находится в пределах 1...10%. Генераторные клистроны с распределенным взаимодействием, работающие в миллиметровом диапазоне, имеют $\eta=6...8\%$ (см. рис. 4.4). У отдельных типов клистронов $\eta=10...14\%$. Например, у клистроны VKE2408A фирмы Varian Ass. of Canada на $f=75$ ГГц и $P_{\text{вых}}=1$ Вт он составляет 10%.

Стабильность частоты. Среди генераторных клистронов более высокую стабильность частоты имеют двухрезонаторные клистроны. ТКЧ этих клистронов на $f=5...40$ ГГц находится в пределах $\pm 0,1... \pm 0,25$ МГц/°С. Генераторные клистроны с распределенным взаимодействием имеют большие значения ТКЧ. В зависимости от рабочей частоты ТКЧ этих приборов составляет $\pm 1... \pm 6$ МГц/°С [48]. Стабильность частоты генераторных клистронов, особенно с распределенным взаимодействием, зависит также от стабильности источников питания.

АМ и ЧМ шумы. В связи с применением генераторных клистронов в доплеровских РЛС и в качестве генераторов накачки параметрических усилителей к ним предъявляются высокие требования по допустимому уровню АМ и ЧМ шумов. Так, например, у клистронов VA521, выпускаемых фирмой Varian для применения в доплеровских РЛС бокового обзора и непрерывной подсветки, АМ шумы в полосе 1 кГц на расстоянии 10 кГц от несущей ниже уровня несущей на 125 дБ. ЧМ шумы составляют всего 0,3 Гц.

Самый низкий уровень шумов достигнут фирмой AEG—Telefunken в трехрезонаторных клистроны ТКХ16033, параметры которых приводились выше. ЧМ шумы этих клистронов на расстоянии 10 кГц от несущей составляют 130 дБ/Гц, а на расстоянии 100 кГц—155 дБ/Гц. Столь малый уровень шумов получен в результате проведения фирмой ряда технологических мероприятий (повышение степени вакуума при откачке до

$1,3 \cdot 10^{-9}$ Па, снижение рабочей температуры катода до 1000°C , устранение вторичных электронов и др.). Эти мероприятия позволили устранить возникновение релаксационных колебаний, появление которых увеличило уровень шумов [162].

Габариты и масса. Конструкция современных генераторных клистронов характеризуется применением постоянных магнитов, принудительного воздушного или водяного охлаждения и преимущественно волноводных выводов СВЧ энергии. Общая масса двухрезонаторных клистронов составляет $0,23 \dots 4,5$ кг. Наиболее компактными и легкими являются, например, клистроны VA532, VA533 и VA534, выпускаемые фирмой Varian для применения в качестве генераторов накачки. Параметры клистронов VA532 и VA534 приведены в табл. 4.9. Габаритные размеры клистронов VA532: длина 76 мм, диаметр 51 мм, а $m=0,26$ кг. Габаритные размеры клистронов VA533: $76 \times 33 \times 25$ мм, а $m=0,26$ кг.

Трехрезонаторные клистроны имеют значительно большие размеры и массу. Например, импульсные генераторные клистроны F2011 и F2052, параметры которых указывались выше, имеют длину 690 и диаметр 200 мм. Общая масса клистронов с распределенным взаимодействием составляет $4,5 \dots 14,5$ кг. Наиболее компактными приборами этой конструкции являются, например, клистроны 34LV20 фирмы OKI—Electric на диапазон частот $33,2 \dots 34,8$ ГГц и мощность 10 Вт. Габаритные размеры этих клистронов $220 \times 130 \times 120$ мм, а масса $4,5$ кг.

Долговечность. Генераторные клистроны, как и многие другие электровакуумные приборы СВЧ, имеют гарантируемый срок службы 1 тыс. ч. Однако фактический средний срок службы этих приборов достигает $5 \dots 10$ тыс. ч. В качестве примеров можно указать двухрезонаторный клистрон VKA7010 фирмы Varian на $f=26 \dots 40$ ГГц с $P_{\text{вых}}=10$ Вт, который, по данным фирмы, имеет средний срок службы $5 \dots 10$ тыс. ч [158]. Все типы клистронов с распределенным взаимодействием на $30 \dots 300$ ГГц, по данным фирмы Varian Ass. of Canada, обладают средним сроком службы $5 \dots 10$ тыс. ч [176].

4.4. ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ КЛИСТРОНЫ

Количество типов отражательных клистронов из года в год сокращается в связи с их заменой твердотель-

ными СВЧ генераторами. Вместе с тем в настоящее время рекламируется более 750 типов этих приборов. Такое обилие типов отражательных клистронов определяется большим разнообразием их технических характеристик и прежде всего по частоте, выходной мощности, стабильности частоты и мощности, а также по конструкции и технологии изготовления.

Бесспорными достоинствами отражательных клистронов являются простота и надежность конструкции, малые габариты и масса, невысокие питающие напряжения, наличие механической и электрической перестройки частоты, механическая прочность, высокая радиационная стойкость, слабая зависимость параметров от изменения температуры окружающей среды и малый уровень АМ и ЧМ шумов. Поэтому отражательные клистроны в настоящее время широко применяются в различной радиоэлектронной аппаратуре. Они используются как генераторы СВЧ колебаний в передатчиках радиорелейных линий связи, маломощных доплеровских РЛС, измерительной аппаратуре, для накачки параметрических усилителей, гетеродинов приемных устройств и т. д.

Технический уровень современных отражательных клистронов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Выпускаемые за рубежом отражательные клистроны работают на $f=0,8 \dots 220$ ГГц [70]. Среди них около 200 типов предназначены для использования в миллиметровом диапазоне волн (30... 220 ГГц). Эти клистроны выпускаются преимущественно фирмой Varian Ass. of Canada. Одним из наиболее высокочастотных является клистрон VRJ2131A на $f=170 \dots 220$ ГГц с минимальной $P_{\text{вых}}=10$ мВт. Он работает при напряжении резонатора $U_p=2550$ В и $I_k=27$ мА. Масса этого прибора 450 г.

Выходная мощность отражательных клистронов находится в широких пределах 10 мВт... 2,5 Вт. Максимальные значения выходной мощности, приведенные на рис. 4.3, являются характерными для клистронов, используемых в основном в качестве генераторов передающих устройств радиорелейных линий связи и маломощных доплеровских РЛС. Одним из отражательных клистронов с повышенной выходной мощностью является клистрон QKK759A фирмы Raytheon на $f=7,75 \dots 8,4$ ГГц с $P_{\text{вых}}=2,5$ Вт. Этот клистрон имеет механическую и электронную перестройку частоты, коаксиаль-

ный вывод энергии и работает при $U_p=750$ В и $I_n=85$ мА.

У большинства отражательных клистронов $P_{\text{вых}}=10\dots 500$ мВт. При этом наибольшие значения являются характерными для клистронов, используемых в качестве генераторов накачки параметрических усилителей и генераторов в измерительной аппаратуре. Отражательные клистроны, применяемые в качестве гетеродинов приемных устройств, имеют $P_{\text{вых}}=10\dots 100$ мВт.

Перестройка частоты. Одной из положительных особенностей отражательных клистронов является наличие возможности механической и электронной перестройки частоты. Механическая перестройка рабочей частоты осуществляется обычно в пределах $1\dots 15\%$. Отдельные типы клистронов миллиметрового диапазона волн имеют механическую перестройку до 40% . Электронная перестройка частоты, осуществляемая изменением отрицательного напряжения отражателя, составляет $0,1\dots 1,0\%$ от номинальной частоты клистроны.

Стабильность частоты. Отражательные клистроны наиболее чувствительны к изменению температуры окружающей среды и нагрузки. ТКЧ отражательных клистронов сантиметрового диапазона волн находится в пределах $\pm 30\dots \pm 300$ кГц/°С, а у клистронов миллиметрового диапазона он достигает ± 6 МГц/°С.

Напряжение резонатора. Отражательные клистроны в зависимости от выходной мощности и частоты работают при $U_p=200\dots 2700$ В. Наибольшие значения относятся к клистронам миллиметрового диапазона. Максимальные напряжения отражателя у клистронов сантиметрового диапазона волн достигают 500 В, а у клистронов миллиметрового диапазона 1000 В. Крутизна электронной перестройки в сантиметровом диапазоне составляет $0,3\dots 1,2$ МГц/В, а в миллиметровом достигает $10\dots 15$ МГц/В.

АМ и ЧМ шумы. По уровню АМ и ЧМ шумов отражательные клистроны уступают только двухрезонаторным генераторным клистроном. Типичным для отражательных клистронов является уровень АМ шумов ~ 115 дБ/кГц при расстоянии от несущей 100 кГц и ЧМ шумов — около 100 дБ/кГц. Отдельные типы отражательных клистронов обладают значительно лучшими шумовыми характеристиками.

Охлаждение. При небольшом КПД, составляющем у маломощных клистронов менее 1% и у мощных до 2...3%, на резонаторе клистронов рассеивается значительная мощность. Маломощные клистроны имеют естественное охлаждение. У мощных отражательных клистронов охлаждение обеспечивается интенсивным воздушным потоком.

Габариты и масса. Среди маломощных электровакуумных генераторов СВЧ отражательные клистроны являются наиболее компактными и легкими приборами. В этих приборах используются короткие электронные пучки, не требующие применения специальных фокусирующих устройств. Габаритные размеры отражательных клистронов зависят от частоты (определяются в основном конструкцией и размерами резонатора). Для повышения стабильности частоты, механической прочности и надежности работы многие типы отражательных клистронов кроме внутреннего резонатора имеют внешний дополнительный резонатор. Механическая настройка частоты этих приборов осуществляется изменением частоты внешнего резонатора. Характерным для современных конструкций отражательных клистронов является также преимущественное применение волноводных выводов СВЧ колебаний и гибких вводов питающих напряжений.

Масса отражательных клистронов сантиметрового диапазона с повышенной выходной мощностью (1...2 Вт) не превышает 0,5 кг. Маломощные отражательные клистроны сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн имеют $m=0,05...0,3$ кг.

Долговечность. Гарантируемый срок службы зарубежных отражательных клистронов в зависимости от частоты составляет 0,15...15 тыс. ч. Наименьшие значения относятся к клистроном коротковолновой части миллиметрового диапазона, а наибольшие — к клистроном длинноволновой части сантиметрового диапазона волн. Гарантируемый срок службы 15 тыс. ч имеют отражательные клистроны QKK1320A и QKK758A фирмы Raytheon. Первый предназначен для работы на $f=4...8$ ГГц, а второй на $f=7,12...7,75$ ГГц. Выходная мощность этих клистронов не менее 1,5 и 1 Вт соответственно. Средний срок службы подобных клистронов превышает 20 тыс. ч. Для самых коротковолновых клистронов VC738 ($f=170...220$ ГГц и $P_{\text{вых}}=25$ мВт)

Таблица 4.12

Основные параметры отражательных клистронов для радиорелейных линий связи

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых'}}$ Вт	$\Delta f_{\text{э'}}$ МГц	$U_{\text{р'}}$ В	$I_{\text{к'}}$ мА	m , г
VA259E	Varian	7,7...8,4	1,0	28	750	80	63
VA237C	"	10,7...11,7	1,5	30	1250	70	450
K366 ¹⁾	Englich Electric, V.	6,12...7,75	1,2	35	750	80	470
TV2126	Thomson — CSF	4,33...5,07	1,8	28	1000	105	—
TV244	То же	5,1...8,5	0,7	30	750	80	620
TV222B-G	" "	5,92...7,42	1,0	28	750	80	340
TV222A	" "	7,42...7,75	0,7	25	750	80	340
TV259	" "	5,9...8,4	1,0	30	750	80	620

¹⁾ Серия приборов.

фирма Varian Ass. of Canada гарантирует сроки службы 150 ч.

Отражательные клистроны достаточно широко применяются в аппаратуре радиорелейной связи. В табл. 4.12 приведены примеры отдельных отражательных клистронов, предназначенных для применения в передающих

Таблица 4.13

Основные параметры отражательных клистронов для накачки параметрических усилителей

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых'}}$ мВт	$\Delta f_{\text{э'}}$ МГц	$U_{\text{р'}}$, В	$I_{\text{к'}}$, мА
VA272	Varian	8,1...10,9	500	40	550	66
BLK829	Varian Beverly	8,8	700	23	500	70
K3079	Englich Electric V.	8,05...8,8	90	35	300	50
K3095	То же	8,6...9,2	90	35	380	50
TV2215A	Thomson—CSF	10,8...10,9	120	35	350	40
TV2218	То же	10,5	500	40	500	66
TV2246A, B	" "	11,2...11,6	400	50	500	66
K3080	Englich Electric V.	16,5...17,5	50	80	330	50
35V12	OKI Electric	33...37	700	—	2400	38
45V12	То же	42...48	275	—	2600	43
KA651	" "	60...67	250	—	2700	30
KA701A	" "	68...72	400	—	2700	30

устройствах радиорелейных линий связи. Отличительными особенностями этих клистронов являются повышенные выходная мощность (до 2 Вт), напряжение резонатора (до 1,25 кВ) и масса (до 0,6 кг). Приведенные в табл. 4.12 клистроны фирмы Thomson—CSF имеют ТКЧ примерно равный $\pm 75 \dots 100$ кГц/°С, крутизну электронной настройки 0,15 ... 0,25 МГц/В, и работают при напряжении отражателя до —500 В.

Примеры клистронов, разработанных специально для накачки параметрических усилителей, приведены в табл. 4.13. Эти клистроны характеризуются также повышенной мощностью (до 0,5 Вт), небольшим диапазоном механической перестройки частоты (до 200 МГц) и работают при напряжениях резонатора до 500 В.

Несмотря на развитие конкурирующих генераторов на твердом теле работы по дальнейшему совершенствованию отражательных клистронов продолжают. В последнее время значительные результаты в этой области получены в Советском Союзе [1, 23].

М. Б. Голантом и его сотрудниками на основе новейших технологических методов разработаны новые конструкции отражательных клистронов, которые по своим размерам и питающим напряжениям не уступают твердотельным СВЧ генераторам, а по выходной мощности и устойчивости к воздействиям факторов внешней среды превосходят их. Эти приборы, получившие название минитронов, по объему на 2...3 порядка меньше обычных отражательных клистронов и работают при более низких рабочих напряжениях [23]. Разработанные образцы минитронов имеют плавную механическую перестройку частоты в пределах более 6% и электронную перестройку до 2,5%. Они работают при $U_p = 60 \dots 85$ В и $I_k < 150$ мА. Масса минитрона составляет 5 г, а масса устройства его механической перестройки частоты всего 1 г [46].

Минитроны обеспечивают надежную работу в жестких условиях эксплуатации (при ударах и вибрации) в диапазоне температур окружающей среды от —60 до $\pm 85^\circ\text{C}$ с ТКЧ $\sim \pm 1$ МГц/°С. Они могут соединяться с любым СВЧ трактом, включая полосковые линии, П-образные и прямоугольные волноводы, через простейший переходной трансформатор. Подобные клистроны могут быть созданы на любой участок сантиметрового диапазона с выходной мощностью в несколько десятков

милливатт. В последнее время достигнуты определенные успехи в создании высокостабильных и малошумящих отражательных клистронов [24, 25].

Глава 5

ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ О-ТИПА

Лампы обратной волны О-типа (ЛОВО) как наиболее широкодиапазонные генераторы с электронной перестройкой частоты занимают особое место среди электровакуумных приборов СВЧ [11, 34]. Применяемые в этих приборах замедляющие системы в виде двухзаходной спирали, встречных штырей или гребенок обеспечивают перестройку частоты генерируемых колебаний в пределах октавы и более изменением напряжения между катодом и замедляющей системой. Принцип устройства ЛОВО схематически изображен на рис. 5.1. Используемый в ЛОВО принцип работы оказался очень эффективным для освоения огромного диапазона частот 1... 630 ГГц [71]. Приборы этого типа в настоящее время являются единственным видом электровакуумных приборов, с помощью которых получены колебания в субмиллиметровом диапазоне волн с достаточной для практики мощностью.

Вместе с тем этим приборам свойственны некоторые недостатки. Например, их частотная характеристика является нелинейной, а амплитудно-частотная характе-

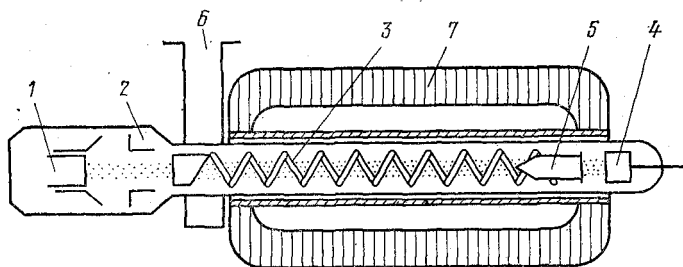


Рис. 5.1. Принцип устройства лампы обратной волны О-типа:
1 — электронная пушка; 2 — первый (ускоряющий) анод; 3 — замедляющая система; 4 — коллектор; 5 — поглощающая нагрузка; 6 — вывод СВЧ энергии; 7 — фокусирующий магнит

ристика — немонотонной с наличием в диапазоне перестройки больших изменений выходной мощности. Для обеспечения высокой стабильности частоты ЛОВО требуется стабилизированный источник питания, создать который при довольно высоких рабочих напряжениях трудно.

ЛОВО, как и все электровакуумные приборы СВЧ, уступают аналогичным по назначению твердотельным приборам по объемно-весовым характеристикам и потребляемой мощности. В настоящее время ЛОВО применяются в качестве гетеродинов и маломощных генераторов в широкодиапазонной аппаратуре радиотехнической разведки и радиопротиводействия, а также в измерительной аппаратуре в качестве свип-генераторов. ЛОВО миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, кроме того, широко применяются в лабораторных условиях при исследовании плазмы, парамагнитного резонанса, изучении тонкой структуры материалов и т. д.

Общее количество ЛОВО, рекламируемых фирмами, составляет около 130 типов. Наметилась тенденция к сокращению номенклатуры приборов этого типа в связи с ростом применения твердотельных СВЧ генераторов. Наибольшую часть существующей номенклатуры составляют маломощные ЛОВО миллиметрового диапазона.

Технический уровень современных ЛОВО характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Рекламируемые в настоящее время ЛОВО работают на $f=1 \dots 350$ ГГц [71]. Известны также отдельные типы ЛОВО, рабочий диапазон которых значительно больше указанного верхнего предела. Например, фирмой Thomson—CSF ранее были разработаны образцы ЛОВО на $f=480 \dots 520$ и $570 \dots 630$ ГГц с минимальной $P_{\text{вых}}=3$ мВт (СО05ЕА и СО06ЕА), но в каталогах последних лет они не указываются.

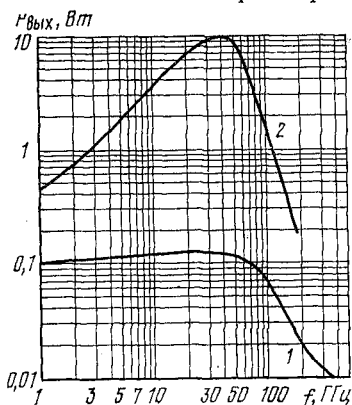


Рис. 5.2. Максимальные значения выходной мощности ЛОВО для приемных (кривая 1) и передающих (кривая 2) устройств

Таблица 5.1

Основные параметры ЛОВ О-типа для приемных СВЧ устройств

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых min}}$ мВт	$U_{\text{ас max}}$ кВ	$I_{\text{к}}$, мА	m , кг
VA183GA	Varian	1,0...2,0	100	0,1	10	7,2
WJ2019-50	Watkins—Johnson	4,0...8,0	120	1,9	13	3,6
WJ2039-50	То же	8,0...12,4	125	2,15	12	4,3
WJ2056-50	"	12,4...18	100	2,1	12	4,1
WJ2061-50	"	18...26,5	70	2,05	10	3,6
RWO40	Siemens	26,5...42,0	120	2,8	18	7,7
BA47F	OKI Electric Ind.	43...52	150	3,6	33	8,0
BA85A	То же	80...90	80	3,6	33	8,8
BA100C	"	95...105	50	2,7	15	8,8
CO10	Thomson—CSF	290...311	10	6,0	60	16
CO09	То же	320...350	10	6,0	60	16

Минимальная выходная мощность в зависимости от назначения и частотного диапазона составляет 10 мВт... 10 Вт. По назначению и выходной мощности приборы этого типа принято делить на маломощные ЛОВО для гетеродинов приемных устройств и ЛОВО с повышенной выходной мощностью для генераторов передающих устройств. На рис. 5.2 приведены графики зависимости наибольших значений выходной мощности от частоты ЛОВО для приемных и передающих устройств. Примеры конкретных типов ЛОВО, выходная мощность которых

Таблица 5.2

Основные параметры ЛОВ О-типа с повышенной выходной мощностью

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых min}}$ Вт	$U_{\text{ас max}}$ кВ	$I_{\text{к}}$, мА	m , кг
SE214A50	Watkins—Johnson	1,0...2,0	0,45	1,5	17	6,6
F4029E	ITT	2,0...4,0	0,7	1,7	55	5,3
VA160N	Varian	5,4...5,9	0,4	0,8	41	3,8
CO30	Thomson—CSF	39,5...40,5	10,0	6,0	80	16
BW050	OKI Electric Ind.	40,0...60,6	2,0	3,0	10	7
CO40B	Thomson—CSF	69,0...71,0	5,0	6,0	60	16
CO40A	То же	73,0...76,0	3,0	6,0	60	16
BW080	OKI Electric Ind.	60,0...90,0	1,0	3,0	10	7
CO20B	Thomson—CSF	128...136	0,2	6,0	60	16
CO20A	То же	150...156	0,2	6,0	60	16

соответствует указанным значениям, приведены в табл. 5.1 и 5.2. Увеличение мощности (табл. 5.2) обеспечивается выбором замедляющих систем, работающих при более высоких значениях напряжения и тока катода.

Следует, однако, иметь в виду, что приведенные значения выходной мощности характеризуют лишь ее минимальный уровень, который гарантируется во всем диапазоне перестройки частоты каждой ЛОВО. Фактическая выходная мощность из-за специфической для этих приборов неравномерности их АЧХ изменяется в диапазоне перестройки в очень больших пределах, превышая на отдельных частотах минимальный уровень во много раз. У отдельных типов ЛОВО перепады мощности в диапазоне перестройки достигают 8...10 дБ с резко выраженным увеличением мощности на высокочастотном краю диапазона. В пределах рабочего диапазона выходная мощность изменяется не плавно, а имеет ряд чередующихся максимумов и минимумов. Перепады мощности между соседними экстремальными значениями достигают 3...5 дБ. Типичные для ЛОВО пределы изменения выходной мощности в рабочем диапазоне приведены в табл. 5.4.

Перестройка частоты. Применение в ЛОВО замедляющих систем с распределенной обратной связью обеспечивает перестройку частоты этих приборов в довольно широких пределах изменением напряжения между катодом и замедляющей системой. Большинство рекламируемых ЛОВО обладает перестройкой частоты в диапазоне

Таблица 53

Основные параметры ЛОВ О-типа с наибольшим диапазоном электронной перестройки частоты

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f, ГГц	Δf_3 , %	$P_{\text{вых min}}$, мВт	$U_{\text{ac max}}$, кВ	I_K , мА
SE214-50	Watkins—Johnson	1,0...2,6	89	25	1,5	—
VA184	Varian	1,7...4,2	85	40	1,2	25
F2553	ITT	2,0...7,0	110	10	1,5	15
F2544	"	4,0...8,0	67	10	2,0	15
VA440M	Varian	3,7...8,3	77	20	1,5	35
VBX7504M	"	7,0...16	78	20	1,7	18
RWO50	Siemens	33...50	41	100	2,7	15
RWO110B	"	75...110	38	15	2,7	15
CO09	Thomson—CSF	320...350	9	10	6,0	60

октавы (67%). Вместе с тем имеются отдельные типы приборов с перестройкой частоты в более широких пределах (до 110% и более). В табл. 5.3 приведены в качестве примера отдельные типы ЛОВО, имеющие наибольший диапазон электронной перестройки. Как видно из этой таблицы, наибольшую перестройку имеют ЛОВО дециметрового и сантиметрового диапазонов волн. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах полоса перестройки хотя в процентном выражении несколько меньше, но по частоте составляет значительную величину (десятки гигагерц).

Отличительной особенностью ЛОВО по сравнению, например, с митронами является то, что они имеют нелинейную зависимость частоты от напряжения замедляющей системы. Поэтому крутизна электронной перестройки в рабочем диапазоне частот ЛОВО не остается постоянной, а изменяется в больших пределах. На длинноволновом краю диапазона каждого прибора крутизна электронной перестройки имеет наибольшее значение. Некоторое представление о пределах изменения в рабочем диапазоне частот крутизны перестройки и выходной мощности можно получить из рассмотрения данных, приведенных в табл. 5.4. В рабочем диапазоне частот крутизна электронной перестройки меняется 2,5... 10 раз и достигает наибольших значений у ЛОВО субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов.

Таблица 5.4

Пределы изменения частоты, выходной мощности и крутизны перестройки ряда типов ЛОВО фирмы Thomson—CSF

Параметр	Тип прибора			
	СО210С	СО94С	СО40А	СО10
Рабочая частота, ГГц:				
минимальная	1,6	3,6	73	296
максимальная	3,2	7,2	76	310
Выходная мощность, Вт:				
минимальная	0,24	0,05	3	0,01
максимальная	1,2	0,3	8	0,08
Крутизна перестройки, МГц/В:				
минимальная	0,5	1	1,2	5
максимальная	5	8	3	40
Максимальное напряжение замедляющей системы, кВ	1,7	1,5	6	6
Ток катода, мА	60	40	60	60

Вместе с тем зарубежными фирмами выпускаются отдельные типы ЛОВО с частотными характеристиками, мало отличающимися от линейной зависимости. Например, у ЛОВО на $f=2 \dots 4$ ГГц отклонение от линейной зависимости не превышает $\pm 5\%$, а на $f=12,4 \dots 18$ ГГц — $\pm 3\%$ [185]. Дальнейшее улучшение частотных характеристик этих приборов достигается применением специальных линейризаторов, которые позволяют сократить указанное отклонение до $\pm 0,5\%$.

ЛОВО обеспечивают достаточно большую скорость перестройки частоты в полном диапазоне. У приборов 10-см диапазона ($2 \dots 4$ ГГц) она достигает 20 ГГц/мкс, а у приборов 2-см диапазона ($12 \dots 18$ ГГц) — 40 ГГц/мкс. ТКЧ этих приборов не превышает ± 4 МГц/°С [185].

АМ и ЧМ шумы. Об уровне амплитудных и частотных шумов можно судить по отдельным сообщениям зарубежных фирм [181, 183]. Например, по данным фирмы Watkins—Johnson ЛОВО типа WJ2008 на $f=8 \dots 12$ ГГц имеют в полосе 1 Гц АМ шумы на расстоянии 1 кГц от несущей около 135 дБ, а на расстоянии 10 кГц эти шумы на 145 дБ ниже уровня несущей [181].

ЧМ шум ЛОВО 3-см диапазона в полосе 1 Гц на расстоянии от несущей $1 \dots 10$ кГц (доплеровские частоты) составляет $0,3 \dots 1,0$ Гц. При этом наименьшее значение наблюдается при расстоянии от несущей 10 кГц [183]. Уровень гармонических составляющих колебаний по сравнению с колебаниями на несущей частоте у современных ЛОВО ослаблен на $30 \dots 50$ дБ [185]. По уровню амплитудных и частотных шумов, а также по степени ослабления гармонических составляющих ЛОВО находятся на уровне обычных отражательных клистронов. По указанным характеристикам они имеют некоторое преимущество перед твердотельными СВЧ приборами.

Габариты и масса. Объемно-массовые характеристики ЛОВО зависят в основном от применяемого спо-

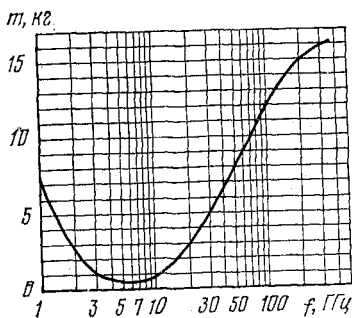


Рис. 5.3. Минимальные значения массы ЛОВО с фокусирующей постоянной магниты

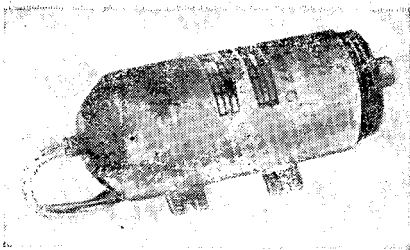
соба фокусировки электронного потока, рабочего диапазона частот и от конструкции вывода СВЧ энергии. В современных конструкциях приборов этого типа используется преимущественно магнитная фокусировка с помощью постоянных магнитов. Масса ЛОВО вместе с постоянными магнитами составляет 0,5...16 кг. Наименьшие значения относятся к приборам сантиметрового диапазона, а наибольшие — к приборам дециметрового и особенно миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн (рис. 5.3).

ЛОВО дециметрового диапазона имеют большую массу магнитов из-за увеличенных размеров замедляющих систем. Возрастание массы приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов вызывается тем, что для обеспечения прохождения электронного потока в замедляющих системах малого размера требуются магниты с более высокой напряженностью магнитного поля. Самыми компактными и легкими из числа ЛОВО с фокусировкой постоянными магнитами, рекламируемыми в последние годы, являются приборы сантиметрового диапазона типа F2556, F2553, F2547 и F2554. Указанные ЛОВО выпускаются фирмой ITT и имеют $m=0,68...$...0,8 кг [70].

Ранее разработанные ЛОВО с электромагнитной фокусировкой из-за большой массы и значительного потребления электроэнергии для питания соленоидов сейчас практически не выпускаются. В частности, по этой причине фирмой Thomson—CSF были сняты с производства самые коротковолновые ЛОВО типа CO05EA и CO06EA, масса которых вместе с соленоидом составляла около 40 кг [76]. Применение в приборах данного типа других способов фокусировки, в том числе магнитно-периодической и центробежно-электростатической (ЦЭФ), не получило распространения [17]. Среди промышленных типов известны только отдельные ЛОВО с магнитно-периодической фокусировкой, например WJ2038-50 на $f=2,6...5,2$ ГГц фирмы Watkins—Johnson. Масса этой ЛОВО в 4 раза меньше массы аналогичной по частоте ЛОВО с постоянными магнитами.

Конструкции вывода СВЧ энергии обычно выбирают также из условия обеспечения минимальных габаритов приборов и удобства их соединения с наиболее распространенными видами СВЧ трактов. На $f=1...16$ ГГц применяются только коаксиальные выводы, поскольку

Рис. 5.4. Гетеродинная ЛОВО типа F4007C



использование волноводных выводов в этом диапазоне частот могло бы привести к неоправданному увеличению габаритных размеров этих приборов. На частотах более 16 ГГц применяются преимущественно волноводные выводы, так как на более высоких частотах размеры волноводов являются сравнительно небольшими и не вызывают заметного увеличения габаритов ЛОВО.

Долговечность. Гарантируемый срок службы ЛОВО чаще всего составляет 1000 ч. Однако фактический срок службы многих типов этих приборов превышает 10 тыс. ч [183]. Фирмой Watkins—Johnson по результатам обобщения статистических данных установлено, что после предварительной наработки ЛОВО в течение 50 ч их долговечность определяется исключительно эмиссионными свойствами катодов. По данным этой фирмы, металлопористые катоды с плотностью тока 1 A/cm^2 способны обеспечить работу ЛОВО в течение 35 тыс. ч. Эти дан-



Рис. 5.5. Гетеродинная ЛОВО типа СО10 субмиллиметрового диапазона

ные подтверждаются результатами испытаний приборов в лабораторных условиях, которые показали, что средняя наработка на отказ составляет 32 тыс. ч [184]. В эксплуатационных условиях эти приборы имеют среднюю наработку на отказ 10 ... 14 тыс. ч.

Примерами наиболее распространенных конструкций гетеродинных ЛОВО с фокусировкой постоянными

магнитами служат приборы, внешний вид которых изображен на рис. 5.4 и 5.5. На рис. 5.4 показана ЛОВО с коаксиальным выводом СВЧ энергии, выпускаемая фирмой Thomson—CSF на $f=4,8 \dots 9,6$ ГГц с $P_{\text{ВЫХ min}} = 20$ мВт. Этот прибор работает при $U_{a1}=200$ В и $U_{zс max}=1,7$ кВ при $I_k \approx 40$ мА. В рабочем диапазоне перестройки частоты выходная мощность меняется в пределах $20 \dots 280$ мВт, а крутизна частотной характеристики — $1,2 \dots 12$ МГц/В. Масса прибора 3,5 кг.

На рис. 5.5 показан внешний вид гетеродинной ЛОВО типа СО10 субмиллиметрового диапазона волн. Параметры прибора приведены в табл. 5.1 и 5.4. Масса этой ЛОВО 16 кг [186].

В перспективе ЛОВО гетеродинного типа будут постепенно вытесняться твердотельными СВЧ генераторами и в первую очередь те из них, которые выпускаются для работы в сантиметровом диапазоне и имеют небольшую выходную мощность. Отдельные зарубежные фирмы при разработках новой измерительной аппаратуры и, в частности, свип-генераторов переходят от ЛОВО к генераторам на полупроводниковых СВЧ диодах и транзисторах. Переход на твердотельные СВЧ приборы обеспечивает меньшие размеры аппаратуры, сравнительно низкую стоимость и более высокую надежность работы [182]. В связи с этим разработка новых ЛОВО значительно сократилась.

Глава 6

ГИБРИДНЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

Одним из перспективных направлений развития СВЧ электроники является создание гибридных приборов. Типичными примерами подобных приборов могут быть твистроны, электронно-полупроводниковые приборы и гибридные защитные устройства. Из всех гибридных приборов наибольшее практическое значение получили твистроны и защитные устройства с применением пассивных резонансных разрядников и твердотельных ограничителей мощности.

6.1. ТВИСТРОНЫ

Твистроны представляют собой комбинацию элементов многорезонаторного клистрона и лампы бегущей волны [188]. В этих приборах колебательная система состоит из двух секций, одна из которых (входная) содержит резонаторы клистронного типа, а другая (выходная) — замедляющую систему, применяемую в мощных ЛБВ. Такое сочетание элементов конструкции колебательной системы обеспечивает расширение полосы пропускания и достижение сравнительно легкой подстройки частоты входной секции во время работы прибора. Преимущество твистронов проявляется в большей степени при высокой выходной мощности (более 1 МВт), когда с помощью обычных многорезонаторных клистронов и ЛБВ не удается достигнуть необходимой широкополосности усиления. Параметры существующих твистронов, разработанных и выпускаемых фирмами Varian и EMI—Varian, приведены в табл. 6.1.

Частота и мощность. Твистроны на $f=1\ldots 6$ ГГц обеспечивают $P_{\text{н}}=2,5\ldots 10$ МВт. Средняя мощность этих приборов 5...30 кВт [69, 194].

Коэффициент усиления. Твистроны в зависимости от числа резонаторов и длины замедляющей системы имеют $K_{\text{у}}=30\ldots 50$ дБ.

Ширина полосы пропускания у отдельных типов твистронов (например, VA143B и VA915A) достигает 15%, в то время как у лучших многорезонаторных клистронов такой же мощности она равна 8%, а у ЛБВ 10% [187].

Ускоряющее напряжение в импульсе $U_{\text{а}}$ составляет 110...180 кВ, а $I_{\text{а}}=70\ldots 150$ А.

Таблица 6.1

Основные параметры импульсных твистронов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{н}}$, МВт	$K_{\text{у}}$, дБ	η , %	$U_{\text{а}}$, кВ	$I_{\text{а}}$, А	m , кг
PT1140	EMI—Varian	1,20...1,38	3	30	30	160	140	64
PT1142	То же	1,22...1,38	3...9	30	30	160	130	64
VA145H	Varian	2,7...2,9	3,25	39	35	145	100	57
VA145B	То же	2,8...2,9	5	40	30	125	92	55
VA143B	"	2,78...3,22	6	36	30	185	150	60
VA145F	"	3,1...3,5	8	36	30	155	125	50
VA915A	"	3,1...3,6	8	53	30	175	145	125
VA913A	"	5,4...5,9	5	40	30	135	98	56

КПД твистронов находится в пределах 30...35%, что также несколько выше, чем у многорезонаторных клистронов и ЛБВ такой же мощности.

Масса. Твистроны без внешней фокусирующей системы имеют $m=50\dots 125$ кг. Они применяются в наземных и корабельных радиолокационных станциях дальнего обнаружения. В связи с перспективностью применения этих приборов в РЭА их номенклатура продолжает пополняться новыми типами [194].

6.2. ЭЛЕКТРОННО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Советскими учеными А. М. Бонч-Бруевичем, Е. С. Гришиным и У. Б. Солматовым в 1957 г. и несколько позднее специалистами фирмы Watkins—Johnson были предложены гибридные приборы, основанные на воздействии электронного пучка на полупроводниковую мишень. В отечественной литературе их принято называть чаще всего электронно-полупроводниковыми приборами (ЭПП) и несколько реже вакуумно-полупроводниковыми или электронно-лучевыми приборами с полупроводниковой мишенью [58, 59]. За рубежом эти приборы получили название EBS, образованное от начальных букв английских слов Electronic Beam Semiconductor [191].

Основными элементами указанных приборов являются электронная пушка, устройства ввода сигналов и модуляции электронного пучка и полупроводниковая мишень с устройством вывода сигналов. Принцип усиления в таких приборах основан на использовании явления бомбардировки диодной полупроводниковой мишени электронным пучком, предварительно промодулированным входным сигналом. Каждый электрон, бомбардирующий мишень, создает в обедненном слое диода множество электронно-дырочных пар; образующийся при этом ток через мишень во много раз превосходит ток электронного пучка. Коэффициент усиления по току в ЭПП составляет более 2000 [192].

За рубежом первые образцы ЭПП были разработаны в 1971 г. фирмой Watkins—Johnson. Позднее к работам по исследованию и созданию аналогичных приборов подключились другие американские фирмы, в том числе Northrop, RCA и Raytheon. Указанными фирмами к настоящему времени созданы ЭПП различного назначения, включая импульсные усилители, модуляторы, усилители видеосигналов, ВЧ и СВЧ усилители и устройства обработки информации.

Устройство одного из разработанных усилительных ЭПП с модуляцией пучка отклоняющей системой с бегущей волной схематически показано на рис. 6.1. Электронный пучок, проходя через отклоняющую систему и пространство дрейфа, под воздействием сигнала отклоняется от своего первоначального положения и бом-

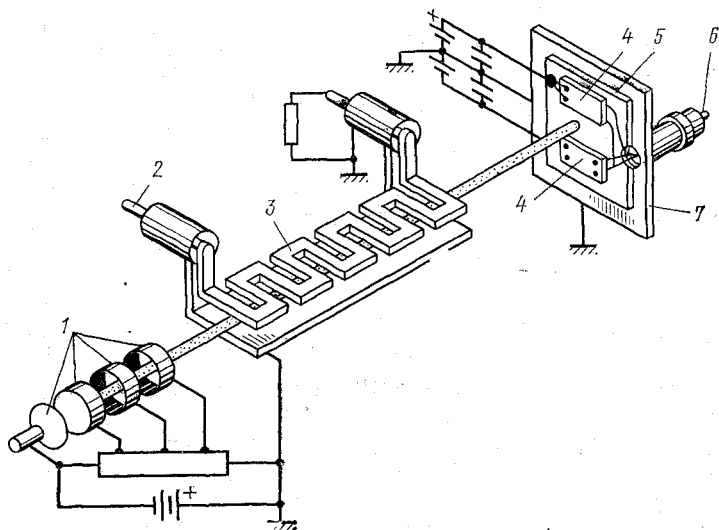


Рис. 6.1. Принцип устройства электронно-полупроводникового прибора с модуляцией пучка отклоняющей системой с бегущей волной: 1 — электронная пушка; 2 — ввод СВЧ сигнала; 3 — отклоняющая система; 4 — полупроводниковые мишени; 5 — подложка из бериллиевой керамики; 6 — вывод СВЧ сигнала; 7 — основание (теплоотвод)

бардирует полупроводниковые мишени, включенные по двухтактной схеме. Расстояние между мишенями подбирается таким, чтобы в отсутствие сигнала ток через мишень был равен нулю. В этом случае ток пучка перехватывается и отводится специальным электродом, размещенным между мишенями.

При подаче сигнала на вход отклоняющей системы электронный пучок поочередно с частотой сигнала облучает верхнюю и нижнюю мишени и создает в них ток, пропорциональный величине входного сигнала. Применение отклоняющей системы с бегущей волной обеспечивает наибольшую рабочую частоту ЭПП, так как в этих системах практически исключаются ограничения, имеющиеся в простейших приборах с сеточным управлением из-за паразитных емкостей и времени пролета электронов [190]. В приборах данного типа применяются и другие способы модуляции пучка, в том числе по скорости и по плотности. Принцип работы таких приборов подробно рассмотрен в литературе [59].

По оценкам зарубежных специалистов, технические характеристики ЭПП могут быть лучше характеристик, соответственных по назначению электровакуумных приборов и их твердотельных аналогов [191, 192]. С помощью этих приборов можно получить, в частности, наиболее высокое значение произведения коэффициента усиления на полосу пропускания, превышающее 500 ГГц, что на 2...4 порядка выше значений, достигнутых на

лучших образцах триодов с сеточным управлением, ЛБВ и транзисторов. Это обеспечивается в результате высокого коэффициента усиления ЭПП.

По сравнению с триодами ЭПП имеют более высокую (на 3 порядка) крутизну характеристики и меньшее (в 100 раз) значение оптимального сопротивления нагрузки, позволяющее уменьшить влияние межэлектродных и других паразитных емкостей на рабочие характеристики этих приборов. Приборы данного типа по сравнению с мощными ЛБВ могут работать при значительно меньших токах пучка, не требуют применения магнитных фокусирующих систем, обладают высокой линейностью амплитудной характеристики и меньшими значениями коэффициента АМ и ЧМ преобразования. По сравнению с усилителями на туннельных и лавинно-противлении диодах ЭПП характеризуются высоким сопротивлением развязки между входной и выходной цепями, а по сравнению с транзисторными усилителями — более высокими коэффициентами усиления. ЭПП благодаря использованию слаботоковых электронных пучков могут иметь большой срок службы, приближающийся к долговечности полупроводниковых приборов.

Основные параметры усилительных ЭПП характеризуются следующими данными.

Частота и мощность. К настоящему времени созданы промышленные и экспериментальные образцы усилителей с рабочей частотой до 3 ГГц. Максимальная рабочая частота этих приборов при использовании отклоняющих систем с распределенными параметрами (плоская спираль или встречно-штыревая система) и применении для их изготовления существующих средств фотолито-

Таблица 6.2

Основные параметры импульсных ЭПП усилителей

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	P_n , Вт	K_y , дБ
WJ3660	Watkins—Johnson	0,16	200	25
WJ3650	То же	0,32	50	20
		0,8	600	—
Экспер.	"	1,5	260	—
Экспер.	"	3,0	20	—
Экспер.	Массацусетский технологический институт	2,0	54	—

графии может быть доведена до $5 \dots 10$ ГГц [191]. Эти усилители имеют $P_{\text{н}}=260$ Вт на $f=1,5$ ГГц. Ожидается, что выходная мощность подобных приборов может быть увеличена до 1 кВт в импульсе и до 100 Вт в непрерывном режиме на $f=1 \dots 4$ ГГц [191].

Достижение более высоких показателей по частоте и мощности ограничивается конструкцией и технологией изготовления устройств модуляции электронного пучка, свойствами полупроводниковых мишеней (напряжение пробоя и подвижность носителей), а также тепловым сопротивлением устройств отвода тепла от мишеней.

КПД существующих образцов усилительных ЭПП при работе в режиме класса В составляет $50 \dots 60\%$ [189].

Долговечность. Срок службы катодов ЭПП вследствие малого токоотбора превышает 30 тыс. ч, а срок службы мишеней значительно превышает указанное значение [192]. Эти предположения подтверждаются результатами испытаний на долговечность отдельных типов приборов. Например, испытания 8 мощных усилителей типа WJ3650 показали, что при удельной нагрузке мишени $\sim 20 \dots 35$ Вт/мм² среднее время наработки на отказ 78 тыс. ч (при доверительной вероятности 60%) [192].

Габаритные размеры. Продольные размеры ЭПП усилителей с отклоняющей системой в отличие от большинства электровакуумных СВЧ приборов не зависят от частоты. Это позволяет создавать компактные гибридные усилители СВЧ с выходной мощностью в несколько киловатт [189].

Параметры отдельных типов усилительных ЭПП, созданных зарубежными фирмами, приведены в табл. 6.2. Новые гибридные приборы пока еще не используются в современной РЭА. По мнению разработчиков фирмы Watkins—Johnson, это является результатом того, что возможности ЭПП долгое время недооценивались. Кроме того, для работы этих приборов необходимо высокое рабочее напряжение (до 10 кВ). Они имеют высокую стоимость, обусловленную сложностью и дороговизной источников питания. Стоимость ЭПП вместе с источниками питания близка к стоимости промышленных ЛБВ средней мощности.

Есть основания полагать, что при достижении технических характеристик, превышающих характеристики из-

Вестных электровакуумных и полупроводниковых приборов, а также при снижении их стоимости, указанные приборы получают практическое применение. Среди них в первую очередь могут найти применение ЭПП для быстродействующих высоковольтных или сильноточных модуляторов для СВЧ приборов, линейные усилители видеоимпульсов с крутым фронтом и линейные усилители ВЧ и СВЧ диапазона.

6.3. ГИБРИДНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Повышение чувствительности приемных устройств, достигаемое при использовании сверхмаломощных параметрических усилителей, усилителей на туннельных диодах и полевых транзисторах, привело к необходимости создания новых видов защитных устройств, свободных от недостатков, присущих активным резонансным разрядникам. Обычные активные (с электродом поджига) резонансные разрядники не могут обеспечить эффективную защиту таких приемных устройств из-за их повышенного уровня шумов, вызываемых вспомогательным разрядом, сравнительно высокой энергии пика просачивающихся импульсов, а также из-за отсутствия защитных свойств при отключении поджига. Кроме того, эти разрядники обладают сравнительно небольшим сроком службы (500...1000 ч).

Создание гибридных приборов, представляющих собой совокупность пассивного резонансного разрядника с полупроводниковым или ферритовым ограничителем мощности, явилось крупным техническим достижением по обеспечению надежной защиты высокочувствительных приемников. Эти приборы позволили исключить применение электродов поджига и связанные с этим дополнительные шумы, существенно снизить мощность и энергию пика просачивающихся импульсов и значительно повысить срок службы этих устройств [193]. К настоящему времени зарубежными фирмами создано уже значительное количество типов гибридных защитных устройств во всем диапазоне частот, используемом в радиолокации.

Технический уровень этих устройств характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Существующие гибридные защитные устройства работают на $f=1,25...36$ ГГц. Рабочая полоса частот каждого устройства составляет

2...18% от номинальной частоты. Все они имеют преимущественно волноводную конструкцию без устройств механической перестройки рабочей частоты. Защитные устройства рассчитаны на работу при различных мощностях от 0,5 кВт до 1 МВт в импульсном и от 50 Вт

Таблица 6.3

Основные параметры гибридных защитных устройств с полупроводниковыми ограничителями

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{н'}$, кВт	$t_{в'}$, мкс	W , 10^{-7} Дж	$P_{пр'}$, мВт	Π , дБ
VLL1000 ¹⁾	Varian Eastern Tube	1,25...1,36	1	20	0,1	20	0,4
VDS1014	То же	2,66...2,96	750	5	0,15	40	0,5
BS194	Englich Electric V.	3,03...3,07	1000	10	0,02	20	0,8
VDC1006	Varian Eastern Tube	5,25...5,71	500	8	0,1	50	0,6
BS190	Englich Electric V.	5,35...5,50	250	15	0,4	60	0,6
VDX1006	Varian Eastern Tube	8,5...9,6	100	3	0,1	50	0,6
VLU1002	То же	16,3	100	0,3	0,1	50	0,5
VDU1001	"	16,2...16,8	125	1	0,1	20	1,0
VDK1000	"	23,5...24,5	5	0,2	0,05	50	0,7

¹⁾ Прибор имеет коаксиальную конструкцию.

до 200 кВт в непрерывном режимах [70]. Параметры конкретных типов гибридных защитных устройств с полупроводниковыми и ферритовыми ограничителями мощности приведены в табл. 6.3 и 6.4.

Таблица 6.4

Основные параметры гибридных защитных устройств с ферритовыми ограничителями

Тип прибора	Диапазон частот, ГГц	$P_{н'}$, кВт	τ , мкс	$t_{в'}$, мкс	W , 10^{-7} Дж	$P_{пр'}$, мВт	Π , дБ
VFS9500	2,9...3,1	15	20	8	0,1	50	0,9
VFS9506	2,9...3,1	20	1	20	0,1	20	1,4
VFS9505	3,1...3,4	15	15	10	0,2	50	0,9
VFX9503	9,3...9,6	50	1	0,1	0,1	50	1,0
VFX9500	9,28...10,0	2,5	1	0,5	0,02	20	0,8
VFU9500	15,8...17,2	15	0,5	0,2	0,1	50	1,5

Энергия пика. Сочетание пассивного разрядника с твердотельными ограничителями мощности позволило снизить энергию пика просачивающихся импульсов на выходе защитного устройства до рекордных значений, составляющих $W=2 \cdot 10^{-9}$ Дж. Большинство типов этих устройств имеет значение W около 10^{-8} Дж [70].

Просачивающаяся мощность. У разрядников с полупроводниковыми и ферритовыми ограничителями $P_{\text{пр}}=20 \dots 50$ мВт. У отдельных типов она достигает 60 мВт. Указанные значения просачивающейся мощности и энергии пика значительно ниже допустимого значения для высокочувствительных приемных устройств.

КСВ. Гибридные защитные устройства, так же как обычные резонансные разрядники защиты приемника (РЗП), достаточно хорошо согласуются с волноводным трактом. Максимальный КСВ на входе этих устройств в режиме приема находится в пределах $1,1 \dots 1,3$ во всем диапазоне частот.

Потери. По значению потерь в режиме приема гибридные защитные устройства уступают обычным РЗП. Дополнительное подключение полупроводникового и особенно ферритового ограничителя вызывает увеличение потерь. Защитные устройства с полупроводниковыми ограничителями имеют потери в режиме приема $\Pi=0,4 \dots 1,0$ дБ. Аналогичные устройства с ферритовыми ограничителями характеризуются повышенными значениями потерь.

Время восстановления. Гибридные защитные устройства с полупроводниковыми и ферритовыми ограничителями имеют время восстановления $t_{\text{в}}=20 \dots 0,1$ мкс в зависимости от импульсной мощности и длительности импульса.

Масса. В зависимости от рабочей частоты масса этих устройств составляет $0,23 \dots 3,6$ кг. Наибольшие значения относятся к устройствам дециметрового диапазона волн и к устройствам с ферритовыми ограничителями.

Долговечность. Срок службы гибридных защитных устройств с полупроводниковыми ограничителями достигает 5 тыс. ч, а с ферритовыми ограничителями — 8,7 тыс. ч [70].

Часть 2

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Глава 7

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВЧ ДИОДЫ И ТРАНЗИСТОРЫ

Полупроводниковые СВЧ диоды и транзисторы вместе с изделиями из ферритов СВЧ составляют основную элементную базу твердотельных СВЧ приборов и устройств, развитию которых в настоящее время уделяется очень большое внимание [3]. Создаваемые на основе полупроводниковых СВЧ диодов и транзисторов твердотельные приборы и устройства все успешнее конкурируют по своим объемно-массовым, энергетическим и надежностным характеристикам с многими классами и видами маломощных электровакуумных приборов СВЧ. В последнее время значительно расширился их диапазон рабочих частот.

Современные полупроводниковые СВЧ приборы и устройства обеспечивают эффективное выполнение различных функций, включая детектирование, смещение и преобразование частоты, усиление, генерирование колебаний, перестройку частоты, переключение и защиту высокочастотных трактов от электрических перегрузок. К 1980 г. электронной промышленностью создана довольно развитая номенклатура полупроводниковых приборов, включающая следующие группы специализированных диодов и транзисторов: детекторные, смесительные, параметрические, модуляторные, умножительные, переключательные, усилительные и генераторные диоды, а также усилительные и генераторные транзисторы [14, 35—37].

Рабочий диапазон частот полупроводниковых приборов расширен до 300 ГГц (рис. 7.1). Предельно высокие рабочие частоты биполярных транзисторов составляют 10 ГГц, полевых транзисторов — 21 ГГц, диодов Ганна — около 100 ГГц и лавинно-пролетных диодов — 300 ГГц. Наибольшие выходные мощности в непрерывном режиме

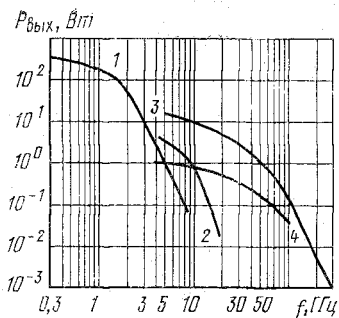


Рис. 7.1. Зависимость максимальной выходной мощности СВЧ диодов и транзисторов в непрерывном режиме от частоты:

1 — биполярные транзисторы; 2 — полевые транзисторы; 3 — ЛПД в режиме IMPATT; 4 — диоды Ганна

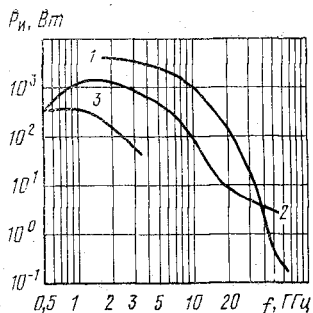


Рис. 7.2. Максимальная выходная мощность СВЧ диодов и транзисторов в импульсном режиме:

1 — диоды Ганна в режиме ОНОЗ; 2 — ЛПД; 3 — биполярные транзисторы

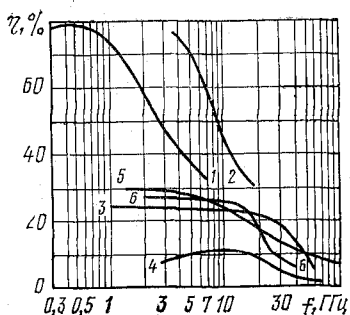
в сантиметровом диапазоне волн получены на транзисторах и лавинно-пролетных диодах (ЛПД).

При работе полупроводниковых приборов в импульсном режиме достигнута еще более высокая мощность (рис. 7.2). Наибольшая импульсная мощность получена на диодах Ганна, работающих в режиме ограничения накопления объемного заряда (ОНОЗ). Она равна 6 кВт на $f=1,75$ ГГц и 1 кВт на $f \approx 10$ ГГц. По достигнутой выходной мощности в непрерывном и импульсном режимах полупроводниковые СВЧ приборы уже не уступают ряду аналогичных по назначению электровакуумных СВЧ приборов малой и средней мощности, таким как отражательные клистроны, митроны, ЛБВ и ЛОВ О-типа.

Среди мощных полупроводниковых СВЧ приборов наиболее эффективными преобразователями энергии постоянного тока в энергию СВЧ колебаний являются транзисторы. Их максимальный КПД=65% на $f=1$ ГГц и 55% на $f=3$ ГГц. На частотах, приближающихся к предельным значениям для этих приборов, их КПД снижается до 30% (рис. 7.3). Полупроводниковые диоды, хотя и позволяют значительно расширить рабочий диапазон частот в сторону высоких частот, но их максимальный КПД в сантиметровом диапазоне не превышает 30%, а в миллиметровом — 10...15%. Тем не

Рис. 7.3. Максимальные значения КПД СВЧ диодов и транзисторов:

1 — биполярные транзисторы; 2 — полевые транзисторы; 3 — диоды Ганна в импульсном режиме ОНОЗ; 4 — диоды Ганна в непрерывном доменном режиме; 5 — ЛПД в импульсном режиме; 6 — диоды Ганна в импульсном режиме



менее полученные данные являются крупным достижением для всего класса СВЧ приборов малой и средней мощности.

Полупроводниковые СВЧ диоды и транзисторы обладают малым уровнем собственных шумов и являются хорошей основой для создания малозумящих и сверхмалозумящих усилителей. Наиболее низкий уровень шума достигнут в полупроводниковых параметрических усилителях (ППУ). У охлаждаемых ППУ $K_{ш} = 0,2 \dots 1,8$ дБ, а у неохлаждаемых $0,8 \dots 3$ дБ (еще меньший $K_{ш}$ имеют только квантовые парамагнитные усилители — лазеры). Низкий коэффициент шума ППУ достигается ценой увеличения сложности их конструкции. По сравнению с усилителями на транзисторах в состав ППУ кроме полупроводникового диода входят генератор накачки, циркулятор для разделения сигналов, а для охлаждаемых ППУ еще и охлаждающее устройство (криостат).

Среди других полупроводниковых приборов наименьший коэффициент шума имеют полевые и биполярные транзисторы и полевые тетроды. С помощью этих приборов создаются оптимальные конструкции малозумящих усилителей. У полевых транзисторов $K_{ш} = 1,2 \dots 5$ дБ на $f = 4 \dots 18$ ГГц. Биполярные транзисторы по предельной частоте и минимальному коэффициенту шума уступают полевым транзисторам. Их предельная рабочая частота достигает пока всего 8 ГГц при $K_{ш} = 7$ дБ, у полевых тетродов $K_{ш} = 3 \dots 4$ дБ.

Туннельные диоды и диоды Ганна работают в более широком диапазоне частот, однако уступают перечисленным приборам по коэффициенту шума. Смесительные диоды на $f = 1,3 \dots 36$ ГГц имеют $K_{ш} = 6 \dots 10$ дБ.

7.1. ДЕТЕКТОРНЫЕ ДИОДЫ

Для детектирования и индикации колебаний в СВЧ диапазоне многие десятилетия широко применяются полупроводниковые детекторные диоды (видеодетекторы) [35]. Известны три конструктивно-технологические разновидности детекторных диодов: точечно-контактные, с барьером Шоттки и с $p-n$ -переходом. Простейшую конструкцию имеют точечно-контактные диоды, обеспечивающие достаточно высокую чувствительность. Диоды с барьером Шоттки по сравнению с точечно-контактными диодами обладают более однородными электрическими параметрами и повышенной устойчивостью к электрическим перегрузкам [15]. Диоды с $p-n$ -переходом также обеспечивают высокую однородность электрических параметров, но уступают обоим типам диодов по предельной рабочей частоте [51]. Всего известно более 500 типов детекторных диодов, имеющих различные конструкции и технические характеристики. Технический уровень этих полупроводниковых диодов характеризуется следующими данными.

Частота. Выпускаемые детекторные диоды работают на $f=0,75 \dots 75$ ГГц. Технические характеристики отдельных типов этих диодов приведены в табл. 7.1. Вместе с тем зарубежными фирмами ведутся работы по созда-

Таблица 7.1
Основные параметры детекторных диодов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	f^2 , ГГц	F_{min} , дБм	$R_{\text{вых}}$, кОм
2AS824	Aertech Industries	2	2	58	1,2...1,5
ABDX50A	KMC Semiconductor	2	2	58	0,425
A2S1061	Aertech Industries	4	4	40	10
A2S1065	То же	8	8	40	20
DC3018	AEI Semiconductors	8...12	9,3	53	0,3
A2S253	Aertech Industries	12,4	10,7	58	0,8...1,6
A2S254	То же	12,4	10,7	59	5...20
BAV75 ¹⁾	Mullard Ltd.	8...12	10,7	49	0,31
DC1313	AEI Semiconductors	12...18	16,5	47	0,2
PKD102—51 ¹⁾	Parametric Industries	18...26	24	57	4,5...18
PKD103—19 ¹⁾	То же	24...35	35	56	4,5...18
MA441	Microwave Ass.	40...75	69,7	35	—

¹⁾ Диоды с барьером Шоттки.

²⁾ Частота, на которой нормируются параметры диода.

нию детекторных диодов на более короткие волны миллиметрового диапазона. Например, фирмой Hughes Electron разработаны две серии детекторов миллиметрового диапазона 4482ХН и 4483ХН на $f=26,5 \dots 110$ ГГц [207].

Серия 4482ХН состоит из шести широкополосных приборов, каждый из которых работает в своем участке диапазона. Минимальная чувствительность на частотах до 75 ГГц равна 100 мВ/мВт, а на частотах до 110 Гц — 75 мВ/мВт. Неравномерность чувствительности по диапазону превышает 1,5 дБ на частотах до 75 ГГц и 2 дБ на частотах до 110 дБ. Серия 4483ХН состоит также из шести приборов, но все они являются узкополосными перестраиваемыми с мгновенной полосой 5 ГГц. Минимальная чувствительность приборов этой серии несколько выше, чем первой, и составляет 200 мВ/мВт на частотах до 75 ГГц и 100 мВ/мВт на частотах до 110 Гц.

Чувствительность. Минимальная чувствительность F_{\min} детекторных диодов находится в пределах от —35 до —58 дБ по отношению к 1 мВт, что означает $3 \cdot 10^{-7}$ и $1,25 \cdot 10^{-9}$ Вт соответственно. С увеличением рабочей частоты чувствительность диодов уменьшается (см. табл. 7.1).

Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$. По сопротивлению в рабочей точке или выходному сопротивлению диоды делятся на низко- и высокоомные. Выходное сопротивление низкоомных диодов составляет 0,2...0,4 кОм, а высокоомных — 1...20 кОм.

Конструкция. Детекторные диоды изготавливаются в основном из Si и GaAs. Примеры наиболее распространенных конструкций этих диодов и детекторных головок показаны на рис. 7.4. В дециметровом и сантиметровом диапазонах волн эти диоды выполняются преимущественно патронной конструкции, в том числе со сменной полярностью, коаксиальной и микроминиатюрной конструкции в стеклянном корпусе; в миллиметровом диапазоне — в виде детекторной камеры из отрезка волновода, содержащей полупроводниковый диод, элементы настройки и коаксиальный вывод по постоянному току.

Устойчивость к перегрузкам. Детекторные диоды выдерживают воздействие СВЧ мощности в пределах 50...100 мВт. Предельно допустимая температура окружающей среды для современных типов кремниевых и арсенидогаллиевых диодов составляет +150°C. Отдель-

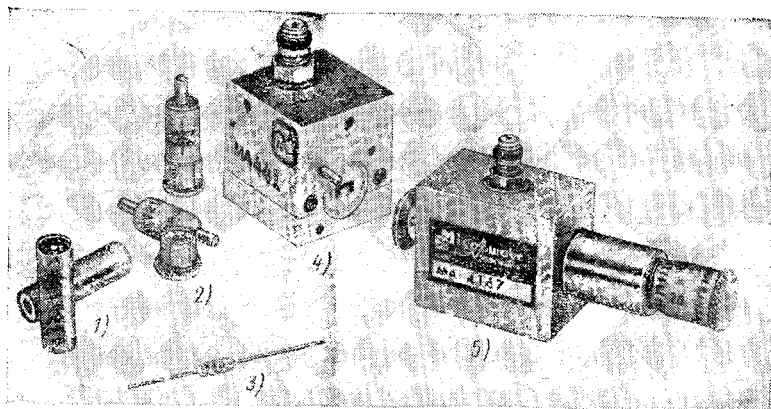


Рис. 7.4. Детекторные диоды и головки различной конструкции:
 1 — коаксиальные; 2 — патронные со сменной полярностью; 3 — микромини-
 турные в стеклянном корпусе; 4, 5 — волноводные на $f=40 \dots 75$ и $80 \dots$
 $\dots 150$ ГГц

ные типы диодов, например 2AS824 фирмы Aertech Industries, имеют предельную температуру $+200^\circ\text{C}$.

Точечно-контактные и особенно диоды с барьером Шоттки и с $p-n$ -переходом хорошо выдерживают механические нагрузки, предъявляемые военными стандартами. Они, например, выдерживают вибрацию с ускорением $20g$, удар с ускорением $1500g$, центробежное ускорение $20\,000g$, температурные циклы от -65 до $+150^\circ\text{C}$ и хранение при температуре $+150^\circ\text{C}$ в течение 1000 ч.

Дальнейшее развитие детекторных диодов направлено прежде всего на создание этих приборов в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн. За прошедшие 10 лет верхний предел рабочей частоты диодов с барьером Шоттки был расширен с 40 до 110 ГГц. Есть основания полагать, что этот предел будет еще сдвинут в сторону более высоких частот.

7.2. СМЕСИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

Среди полупроводниковых СВЧ диодов наиболее распространенными являются смесительные диоды. Они широко применяются для преобразования частоты в супергетеродинных приемных устройствах СВЧ диапазона. Конструкция и технические характеристики этих диодов непрерывно совершенствуются в связи с потребностями

Таблица 7.2

Основные параметры смесительных диодов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	f^2 , ГГц	$K_{ш}^2$, дБ	L^2 , дБ	KCB^2	$R_{\text{вых}}$ Ом
A2S350 ¹⁾	Aertech Industries	3 ²⁾	2	7	—	1,5	150...250
A2S577 ¹⁾	То же	1...6	2	6	—	1,5	100...250
A2S221 ¹⁾	"	1...4	3	6	—	2,0	200...400
A2S579 ¹⁾	"	2...6	3	6	—	1,5	100...250
HP5082—2213	Hewlett Packard	—	3	6	—	1,5	200...400
DC1505G	AEI Semiconductor	—	3	6,5	5,0	1,5	350 ³⁾
DC1505F	То же	—	3	5,5	4,0	1,5	350 ³⁾
DC1304C	"	12 ²⁾	9,4	5,5	4,0	1,5	500 ³⁾
DC1533G	"	12 ²⁾	9,4	6,5	5,0	2,0	350 ³⁾
A2S121 ¹⁾	Aertech Industries	12...36	16	6,5	—	1,5	175...350
BAV71 ¹⁾	Mullard Ltd.	26...40	35	10	5,9	1,8	900...1200
MDX623 ¹⁾	Texas Instruments	25...75	60	—	5,0	—	100...200
DC1308	AEI Semiconductor	25...100	36	10,5	8,5	2,5	100...200

1) Диоды с барьером Шоттки.

2) Максимальное значение.

3) Минимальное значение.

4) Частота, на которой нормируются параметры диода.

освоения новых частотных диапазонов, а также с применением методом конструирования РЭА на основе СВЧ гибридных интегральных схем (блоков).

Они так же, как детекторные диоды, имеют три конструктивно технологические разновидности (точечно-контактные, с барьером Шоттки и с $p-n$ -переходом). Среди новых типов смесительных диодов, появившихся в последние годы, наибольшую часть составляют диоды с барьером Шоттки [72]. В качестве полупроводникового материала для изготовления смесительных диодов используется Si и GaAs. При этом наиболее высококачественные диоды создаются преимущественно на основе GaAs.

В настоящее время насчитывается более 1050 типов смесительных диодов с применением различных конструктивно-технологических принципов. Технический уровень этих диодов характеризуется следующими данными.

Частота. Смесительные диоды созданы на $f=0,7...110$ ГГц [72]. Технические характеристики некоторых типов этих диодов приведены в табл. 7.2. Заслуживают внимания серии диодов, работающих на $f=26...110$ ГГц с потерями преобразования 5,5 дБ на $f=35$ ГГц и 8 дБ на $f=94$ ГГц. Имеется сообщение о создании супергете-

родинного приемного устройства, работающего на $f = 230$ ГГц и имеющего в двухполосном режиме $K_{ш} \approx 13,5$ дБ [160].

Коэффициент шума. Гарантированные значения коэффициента шума рекламируемых зарубежными фирмами смесительных диодов составляют 5,5...10,5 дБ [72]. Эти значения получены при измерении параметров диодов в стандартных приемных устройствах с коэффициентом шума усилителя промежуточной частоты, равным 1,5 дБ. Наименьшие значения относятся к смесительным диодам дециметрового и сантиметрового диапазонов, а наибольшие — к диодам миллиметрового диапазона волн.

Зарубежными фирмами продолжают работы по созданию малошумящих смесительных диодов. В частности, фирмой Hewlett—Packard разработана серия смесительных диодов с барьером Шоттки на $f = 1 \dots 18$ ГГц, коэффициент шума которых на частоте 9 ГГц не превышает 6 дБ [211]. Эти диоды в целях уменьшения паразитных емкостей выполнены в квадратных корпусах с размерами сторон 1,27 мм, имеют балочные выводы и предназначены для полосковых и микрополосковых гибридных интегральных СВЧ схем.

Потери преобразования L . Смесительные диоды обладают высокой эффективностью преобразования частоты сигналов СВЧ. Потери мощности при этом находятся в пределах от 4 до 8,5 дБ. Наибольшие значения потерь относятся к смесительным диодам миллиметрового диапазона волн.

КСВ. Показателем согласования смесительного диода с СВЧ трактом служит КСВ, измеряемый на входе смесительной камеры с испытуемым диодом. Для большинства конструкций смесительных диодов характерны небольшие значения КСВ, которые обычно составляют 1,3...2,5.

Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$. Выходное сопротивление смесительных диодов имеет важное значение для согласования диода с усилителем промежуточной частоты. При разработке диодов принимаются меры к тому, чтобы выходное сопротивление было близко к типовому значению входного сопротивления усилителя. Однако полного соответствия получить не удается. Выходное сопротивление диодов на промежуточной частоте чаще всего составляет 100...500 Ом. У лучших типов смеси-

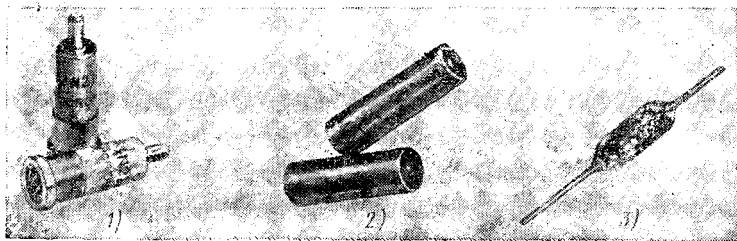


Рис. 7.5. Смесительные диоды различной конструкции: 1 — патронные, в том числе со сменной полярностью; 2 — коаксиальные; 3 — микроминиатюрные в стеклянном корпусе

тельных диодов отношение максимального и минимального значений выходного сопротивления не превышает 2.

Конструкция. Основным типом конструкции смесительных диодов дециметрового и длинноволновой части сантиметрового диапазонов является патронная конструкция, а для коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн — коаксиальная. Примеры конструктивного оформления этих диодов показаны на рис. 7.5. Диоды патронной конструкции изготавливаются прямой, обратной и переменной полярности (со съемным ниппелем). Для использования смесительных диодов в балансных смесителях они поставляются парами, которые подбираются по идентичности их технических характеристик. В целях уменьшения разброса параметров диодов практикуется их разбивка по литерам.

В настоящее время в связи с созданием миниатюрных смесительных устройств на основе полосковых линий и внедрения технологии гибридных схем появились новые миниатюрные конструкции смесительных диодов, конфигурация и размеры которых приведены на рис. 7.6. Корпуса типов М787 и М792 применяются, в частности, при изготовлении смесительных диодов миллиметрового диапазона DC1308 и MDX632 соответственно. Параметры этих диодов приведены в табл. 7.2. Корпуса типов А316 и А320 используются при изготовлении диодов сантиметрового диапазона.

Устойчивость к перегрузкам. Смесительные диоды должны иметь высокую электрическую прочность, особенно в случаях, когда смесительное устройство подключается к приемно-передающему СВЧ тракту без входного СВЧ усилителя. Существующие смесительные диоды вы-

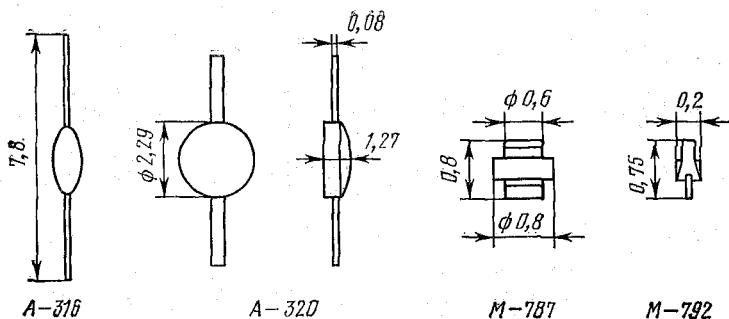


Рис. 7.6. Миниатюрные смесительные диоды для полосковых и микрополосковых линий

держивают воздействие импульсной СВЧ мощности от 0,1 до 1 Вт и $W=2 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-6}$ Дж (0,2...10 эрг). В качестве примера смесительных диодов, выдерживающих энергию пика 10^{-6} Дж (10 эрг), можно указать диоды MD220F фирмы Texas Instruments, рассчитанные на $f=12 \dots 36$ ГГц и имеющие на частоте 16 ГГц гарантируемый $K_{ш}=7,5$ дБ.

Смесительные диоды, так же как и детекторные, по механической прочности и климатической устойчивости отвечают высоким требованиям. Предельно допустимая температура окружающей среды для большинства современных смесительных диодов составляет 125...150°C. Отдельные типы диодов обеспечивают работу при температуре 200°C. Дальнейшее совершенствование смесительных диодов направлено на расширение их верхнего частотного предела, уменьшение коэффициента шума и изыскание наиболее оптимальных конструктивно-технологических решений по созданию диодов для гибридных интегральных СВЧ микросхем.

7.3. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

Туннельные диоды являются одними из первых полупроводниковых приборов, обладающих универсальными свойствами. С начала их создания японским физиком Эсаки в 1958 г. они продолжают непрерывно совершенствоваться и в настоящее время широко применяются в качестве генераторов, усилителей, детекторов и преобразователей в широком диапазоне частот, включая сантиметровый и миллиметровый. Основные достоинства

туннельных диодов: высокий частотный предел, малая потребляемая мощность, высокая стабильность частоты, низкий уровень шумов, повышенная устойчивость к механическим, климатическим и радиационным воздействиям, простота конструкции и малые габариты. К недостаткам этих приборов следует отнести малую выходную мощность [14, 35].

При изготовлении туннельных диодов в качестве полупроводникового материала используют германий, кремний, арсенид галлия, антимонид галлия и антимонид индия. Выбор материала полупроводника определяется назначением и областью применения туннельных диодов. Диоды на основе германия и антимонида галлия обладают наименьшим уровнем собственных шумов и поэтому используются в маломощных усилителях. Арсенидо-галлиевые диоды имеют большую выходную мощность и предпочтительны при изготовлении СВЧ генераторов. Кремниевые туннельные диоды отличаются от других возможностью работы при высоких температурах до 250 ... 450°C, а диоды из антимонида индия являются наиболее высокочастотными.

Туннельные диоды длительное время занимали важное место среди полупроводниковых СВЧ приборов. На их основе было создано много типов маломощных усилителей и маломощных генераторов в диапазоне частот до 40 ГГц. Однако с появлением и развитием СВЧ транзисторов, ЛПД и диодов Ганна спрос на туннельные диоды стал резко сокращаться. Это связано с тем, что они, сохраняя указанные выше достоинства, по значению минимально достижимого коэффициента шума стали уступать не только параметрическим усилителям, но и усилителям на биполярных и полевых транзисторах, а по максимальной выходной мощности — ЛПД и диодам Ганна. В то же время усилители на туннельных диодах продолжают выпускаться на диапазонах частот, которые пока недоступны для СВЧ транзисторов. Технический уровень выпускаемых туннельных диодов СВЧ характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Туннельные диоды созданы на $f=0,1 \dots 100$ ГГц. Однако, как уже отмечалось, существенным недостатком этих приборов является относительно небольшая генерируемая мощность. В дециметровом диапазоне их максимальная выходная мощность составляет десятки милливольт, а в миллиметровом — всего не-

Основные параметры туннельных диодов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	$f_{\text{пред}}$, ГГц	$I_{n'}$, мА	I_n/I_B	C_d , пФ	$R_{\text{п}}$, Ом
G25002D	KMC Semiconductor	2,5	2	6	7,5	2
G50002D	То же	5,0	2	6	4,0	2
TD412	General Electric	10	2,35	8	1,2	4
MA4607A	Microwave Ass.	15	10	6	2,4	3
A20020D	KMC Semiconductor	20	20	—	1,0	4
MA4655	Microwave Ass.	25	20	10	1,2	3
A30020D	KMC Semiconductor	30	20	—	0,53	6
A40005D	То же	40	5	—	0,19	8
A40010D	"	40	10	—	0,26	7
A40020D	"	40	20	—	0,39	7
TD418	General Electric	50	2,35	8	0,15	7
TD419	То же	65	2,35	8	0,11	8
TD429	"	65	2,85	8	0,12	8

сколько микроватт. Так, например, от одного диода на $f=58$ ГГц была получена $P_{\text{вых}}=25$ мкВт, а на $f=90$ ГГц $P_{\text{вых}}=2$ мкВт. Для увеличения уровня выходной мощности применяется параллельное соединение двух диодов в одном генераторе или соединение нескольких генераторов. Например, если один туннельный диод из GaAs на $f \approx 1,6$ ГГц имеет $P_{\text{вых}}=13$ мВт, то параллельное соединение двух таких диодов позволяет повысить мощность до 25 мВт. Параллельное соединение 8 генераторов каждый на двух диодах обеспечивает на этой же частоте $P_{\text{вых}} \approx 100$ мВт.

Электрические параметры туннельных диодов в отличие от других полупроводниковых СВЧ приборов принято оценивать по их статическим характеристикам: пиковому и минимальному токам, отношению этих токов, емкости диода, сопротивлению потерь, а также по значению предельной частоты [35]. Типичные значения электрических параметров отдельных типов туннельных диодов приведены в табл. 7.3. Как видно из этой таблицы, туннельные диоды на более высокие частоты характеризуются относительно малыми значениями емкости и более высокими сопротивлениями потерь [72].

Перестройка частоты. Туннельные диоды позволяют осуществлять электронную перестройку частоты. Наиболее простой способ перестройки — изменение напряжения смещения на туннельном диоде. Поскольку допу-

стимый интервал смещений, в котором существует отрицательное сопротивление, очень мал, то изменение частоты генерации ограничено. Обычно так обеспечивается перестройка в пределах до 15% от номинальной частоты. Вместе с тем на отдельных типах диодов из GaAs достигнута октавная перестройка частоты генератора (67%).

Коэффициент усиления. Туннельные диоды могут применяться в качестве активных элементов малошумящих усилителей СВЧ. Они обеспечивают достаточно большой коэффициент усиления, который может находиться в пределах 8 ... 38 дБ. Однако в целях повышения стабильности работы усилителей на туннельных диодах в реальных условиях эксплуатации коэффициент усиления одного диода выбирается в пределах 10 ... 20 дБ. При необходимости получения более высоких значений коэффициента усиления применяются схемы последовательного включения двух и более каскадов усилителей. Например, в усилителе типа Т7531 на туннельных диодах, работающего на $f=10 \dots 11$ ГГц, достижение $K_{\gamma}=50$ дБ обеспечивается последовательным соединением четырех каскадов.

Полоса пропускания. Отрицательное сопротивление туннельных диодов сохраняется во всем диапазоне частот, начиная от постоянного тока до резистивной предельной частоты. Это свойство туннельных диодов обеспечивает возможность создания весьма широкополосных усилителей и вместе с тем создает некоторые трудности в достижении высокой стабильности работы усилителей. Таким образом, обеспечение широкой полосы пропускания усилителей на туннельных диодах зависит в основном от схемных решений и от широкополосности применяемых пассивных СВЧ элементов (гибридных волноводных соединений, направленных ответвителей, ферритовых циркуляторов и др.). В реальных усилителях на туннельных диодах в диапазоне СВЧ полоса пропускания составляет от нескольких процентов до октавы (67%) и более.

Коэффициент шума. Туннельные диоды по своим шумовым характеристикам лучше смесительных диодов, диодов Ганна и сверхмалошумящих ЛБВ. Их минимальный $K_{ш}=4$ дБ на $f=1$ ГГц, 5 дБ на $f=10$ ГГц и 7 дБ на $f=20$ ГГц (см. рис. 8.4). При этом наименьшие значения коэффициента шума получены на туннельных диодах из

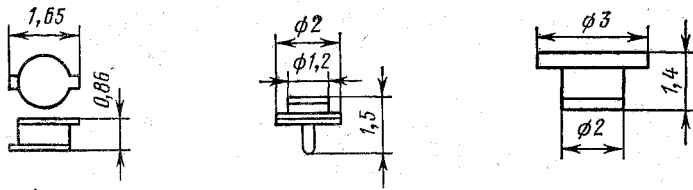


Рис. 7.7. Габаритные размеры туннельных диодов различной конструкции

антимонида галлия. Усилители на туннельных диодах по коэффициенту шума уступают транзисторным и особенно параметрическим усилителям. Однако по возможности работы при высоких температурах и в условиях повышенной радиации туннельные диоды не имеют себе равных.

Габариты и масса. Наиболее распространенные конструкции туннельных диодов, применяемых в диапазоне СВЧ, показаны на рис. 7.7. Конструкции диодов чрезвычайно просты и имеют очень малые размеры. Особенно малы диоды, предназначенные для применения в миллиметровом диапазоне волн. Такие размеры диодов вызваны необходимостью сведения к минимуму паразитной емкости патрона и выводов диода и его суммарной индуктивности. Масса диодов также очень мала и составляет от десятых долей грамма до 1 г.

Источники питания. Одним из преимуществ туннельных диодов является малое потребление энергии постоянного тока (около 10^{-4} Вт). Напряжение для выведения диода в рабочую точку в зависимости от материала полупроводника 0,2 ... 0,6 В. Источник постоянного напряжения для схем с туннельными диодами должен удовлетворять двум основным требованиям: иметь высокую стабильность и малое внутреннее сопротивление. Нестабильность напряжения приводит к резкому изменению отрицательного сопротивления и, как следствие, к нестабильности усиления или выходной мощности.

Долговечность и надежность. Туннельные диоды в отличие от других полупроводниковых приборов могут работать при температуре до 250 ... 450°C. Радиационная стойкость этих диодов на несколько порядков выше, чем у транзисторов, и составляет 10^{17} нейтр./см². Средний срок службы диодов значительно превышает десятки тысяч часов.

7.4. ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫЕ ДИОДЫ

Генерация СВЧ колебаний при лавинном пробое полупроводниковых приборов впервые была обнаружена А. С. Тагером, А. И. Мельниковым и другими в 1959 г. В дальнейшем на основе обнаруженного эффекта были созданы специальные полупроводниковые приборы, получившие название лавинно-пролетных диодов (ЛПД) [13]. Начиная с 1964 г. аналогичные диоды стали разрабатываться и выпускаться многими зарубежными фирмами.

Схематическое изображение структуры ЛПД с одной и двумя пролетными областями показано на рис. 7.8. Принцип работы этих диодов основан на использовании явления образования отрицательного дифференциального сопротивления, возникающего в результате пролета (дрейфа) носителей зарядов при лавинной ударной ионизации p — n -перехода [14, 35]. При подаче на диод обратного напряжения, близкого к пробивному, в области p — n -перехода начинается процесс лавинного пробоя. Образовавшиеся при этом электроны и дырки под воздействием приложенного напряжения движутся в пролетных промежутках к своим электродам.

Величина пролетных промежутков выбирается такой, чтобы время прохождения их носителями зарядов соответствовало примерно четверти периода высокочастотных колебаний внешнего резонатора. При соблюдении этого условия лавины электронов (и дырок в двухпролетных структурах) движутся в тормозящем высокочастотном поле, отдавая свою энергию во внешнюю цепь. В двухпролетных (двухдрейфовых) структурах отдаваемая мощность и КПД выше, чем у однопролетных (однодрейфовых), потому, что общая генерируемая мощность определяется как электронами, так и дырками.

Одна и та же структура может использоваться в двух режимах работы: классическом лавинно-пролетном (ИМРАТТ) и в режиме с захваченной плазмой (ТРАПАТТ). В зависимости от этого зарубежные ЛПД называются соответственно ИМРАТТ- и ТРАПАТТ-диодами. ИМРАТТ-диоды, изготавливаемые из Si или GaAs, по сравне-

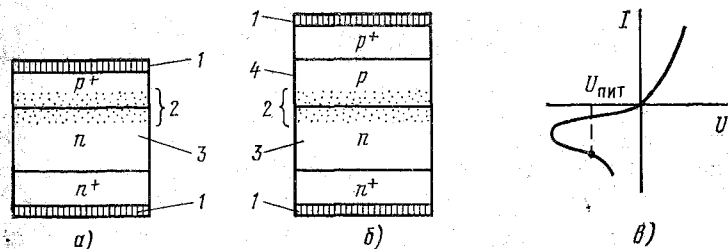


Рис. 7.8. Схематическое изображение структуры однопролетного (а) и двухпролетного (б) ЛПД и их ВАХ (в):

1 — контактный слой; 2 — область образования лавины (p — n -переходов); 3 — область дрейфа электронов; 4 — область дрейфа дырок

нию с TRAPATT-диодами работают при малых значениях тока, но на более высоких частотах. Поэтому они являются наиболее перспективными для применения в миллиметровом диапазоне волн. TRAPATT-диоды, изготавливаемые из Si, обеспечивают получение более высокой выходной мощности при достаточно высоком КПД и используются преимущественно в генераторах и усилителях мощности сантиметрового диапазона волн.

Кроме указанных диодов, существует еще одна разновидность ЛПД, работающих в инжекционно-пролетном режиме и получивших название BARITT-диодов. BARITT-диоды изготавливаются также из Si и имеют два $p-n$ -перехода, разделенных равномерно легированной пролетной областью. Один из переходов инжектирует носители зарядов в пролетную область, а другой собирает их. Разность фаз между напряжением на диоде и током, проходящим через него, приводит к появлению небольшого отрицательного сопротивления, которое используется для усиления или генерации СВЧ колебаний. BARITT-диоды имеют сравнительно малую выходную мощность и низкий КПД, но в отличие от других ЛПД обладают малыми шумами, повышенной линейностью фазовой характеристики и высокой надежностью. Поэтому они используются в маломощных и маломощающих усилителях во входных цепях СВЧ приемных устройств.

ЛПД в отличие от других твердотельных источников СВЧ колебаний имеют наибольшую выходную мощность в коротковолновой части сантиметрового диапазона и могут работать на самых высоких частотах [207]. Вместе с тем они существенно уступают многим видам полупроводниковых диодов и транзисторов по коэффициенту шума и поэтому не могут претендовать на применение в маломощающих усилителях.

В настоящее время за рубежом разработано и выпускается около 300 типов ЛПД на различные участки частотного диапазона. Ведутся интенсивные исследования и разработки, направленные на создание новых ЛПД с более высокими выходной мощностью, КПД и предельными рабочими частотами. Значительные результаты в создании ЛПД получены фирмами Hughes, Hewlett—Packard, NTT, Hitachi, Fujitsu и др. Технический уровень существующих промышленных и экспериментальных ЛПД характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Среди полупроводниковых СВЧ приборов только ЛПД и диоды Ганна обладают наибольшими потенциальными возможностями работы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах (см. рис. 7.1). Создано много типов ЛПД, работающих на $f=0,5 \dots 394$ ГГц [208—210]. Самыми высокочастотными ЛПД являются IMPATT-диоды, разработанные японскими фирмами NTT и Hitachi [72]. Разработаны кремниевые однопролетные IMPATT-диоды со структурой p^+-p-n^+ -типа, которые в волноводном резонаторе сечением $1,08 \times 0,54$ мм имели максимальную рабочую ча-

Таблица 7.4

Основные параметры генераторных ЛПД непрерывного режима

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$ Вт	η , %
HP5082-0423	Hewlett—Packard	4...6,4	1,5	5,5
ML4803	Microwave Ass.	5...8,0	1,5	5,5
MS824A	Raytheon	7,1...8,5	1,8	12,5
MS925A	"	9...11	3,5	20,0
HP5082-0710	Hewlett—Packard	10	3,0	11,0
MS927A	Raytheon	12...14	2,5	20,0
MS928A	"	14...16	2,5	17,0
PGG222-34	Parametric Ind.	18...26	0,15	2,5
PGG225-34	То же	26...40	0,075	2,0
Не известен	Fujitsu	55	1,6	11,5
Не известен	Bell Laboratories	120	0,25	—
Не известен	NTT	185	0,08	2,3
Не известен	"	202	0,05	1,3
Не известен	"	301	0,001	—

стоту 394 ГГц. Их $P_{\text{вых max}}=78$ мВт на $f=185$ ГГц при $\eta=2,3\%$, на $f=285$ ГГц—7,5 мВт при $\eta=0,35\%$ и на $f=361$ ГГц—0,2 мВт [208].

Максимальные значения выходной мощности ЛПД при работе в непрерывном режиме составляют 20 ... 40 Вт на $f=0,5 \dots 10$ ГГц, до 1,5 Вт на $f=20 \dots 60$ ГГц, до 100 мВт на $f=100 \dots 200$ ГГц и до 10 мВт на $f \approx 300$ ГГц (см. рис. 7.1). Ограничения в повышении выходной мощности ЛПД связаны в основном с обеспечением эффективного отвода тепла от их активной области.

Современные ЛПД работают при очень высоких плотностях мощности, приближающихся к 10^6 Вт/см². При таких крайне высоких значениях плотности мощности особенно важными становятся вопросы правильного конструирования этих приборов. Сейчас известны различные приемы повышения эффективности отвода тепла от диодов. Среди них можно отметить, например, применение обращенной мезаструктуры, контактов с барьером Шоттки, ультразвуковой пайки и алмазных теплоотводов [51]. Примеры отдельных промышленных и экспериментальных ЛПД непрерывного режима приведены в табл. 7.4. Приведенными примерами не исчерпываются имеющиеся возможности дальнейшего повышения выходной мощности этих приборов. Зарубежные специалисты считают, что при совершенствовании профилей легирования, улуч-

Таблица 7.5

**Основные параметры мощных импульсных кремниевых ЛПД
в режиме TRAPATT**

Фирма- изгото- витель	Число структур в одном кор- пусе	f , ГГц	$P_{и}$, Вт	τ , нс	η , %
RCA	1	0,5	470	0,2	44
RCA	1	0,95	575	0,2...1,0	23
RCA	4	1,0	1000	0,5	30
RCA	5	1,1	1200	—	25,6
RCA	5	1,9	1200	0,5...1,0	24
RCA	—	3,3	200	100	—
RCA	1	7,2	27	0,25	42,5
RCA	1 ¹⁾	8,1	15	0,25	21,5
RCA	1	10,7	106	—	3,7
Hughes	1 ¹⁾	39	11	0,35	10
Hughes	1 ¹⁾	94	5,4	—	6,5
Hughes	1 ¹⁾	140	0,72	0,3	4,0
Hughes	1 ¹⁾	212	0,21	0,05	1,5

¹⁾ Двухпролетные структуры.

шении геометрии диода и его теплоотвода можно ожидать увеличения выходной мощности ЛПД в непрерывном режиме к 1980 г. до 30 Вт на $f=10$ ГГц, 10 Вт на $f=20$ ГГц, 3 Вт на $f=50$ ГГц и 0,3 Вт на $f=200$ ГГц [51].

ЛПД имеют также значительные преимущества перед другими полупроводниковыми СВЧ приборами (за исключением диодов Ганна) по максимально достижимой выходной мощности в импульсном режиме. Для работы в импульсном режиме зарубежными фирмами создано большое количество типов ЛПД, работающих на $f=0,5 \dots 200$ ГГц. Максимальная выходная мощность этих приборов достигает 1,2 кВт на $f=1 \dots 2$ ГГц, 100 Вт на $f=10$ ГГц, 10 Вт на $f=40$ ГГц. На $f > 100$ ГГц $P_{и}$ составляет сотни милливатт (см. рис. 7.2). Примеры отдельных типов импульсных ЛПД приведены в табл. 7.5.

КПД. За последнее время разработчиками ЛПД для повышения КПД и выходной мощности этих приборов было предложено много различных конструктивно-технологических решений, например, таких, как использование двухпролетных структур с новыми геометрическими формами, применение параллельного или последовательного соединения нескольких диодов в одном корпусе,

использование новых материалов и конструкций теплоотводов и др. Зарубежным фирмам удалось значительно повысить КПД современных ЛПД. Максимальные значения КПД при работе ЛПД в импульсном режиме сейчас составляют около 30% на $f=1 \dots 3$ ГГц, 25% на $f=8 \dots 10$ ГГц, 12% на $f=50$ ГГц и 8,5% на $f \approx 100$ ГГц (см. рис. 7.3).

Вместе с тем имеются отдельные экспериментальные образцы ЛПД, КПД которых значительно превышают указанные выше максимальные значения, характерные для большинства приборов этого типа. Так, например, фирмой Raytheon разработан арсенидо-галлиевый IMPATT-диод с барьером Шоттки на $f=8 \dots 10$ ГГц, который при работе в непрерывном режиме имеет $P_{\text{вых}}=8$ Вт и $\eta=35\%$. Фирмой Hughes разработан кремниевый TRAPATT-диод на тот же диапазон, имеющий в импульсном режиме $\eta=42,5\%$ и $P_{\text{и}}=27$ Вт при $\tau=1$ мкс и $K_3=0,1\%$ [211]. Приведенные примеры указывают на возможность дальнейшего повышения КПД ЛПД как импульсного, так и непрерывного режимов.

Коэффициент усиления. Первоначально ЛПД использовались только для генерации СВЧ колебаний, а их **усилительные свойства** оставались без внимания. В последнее время эти приборы стали применяться в усилителях мощности и в выходных каскадах маломощных усилителей на частотах выше 5 ГГц.

Основные преимущества ЛПД перед другими полупроводниковыми СВЧ приборами, включая диоды Ганна, состоят в том, что они имеют более высокую выходную мощность и КПД в непрерывном режиме работы во всем диапазоне частот 5 ... 100 ГГц. В отличие от диодов Ганна они являются менее широкополосными. ЛПД, так же как и диоды Ганна, обеспечивают сравнительно небольшое усиление, которое с учетом необходимого запаса по устойчивости работы составляет всего 5 ... 9 дБ. При необходимости получения более высокого коэффициента усиления применяется каскадное включение нескольких ЛПД.

Полоса пропускания. Усилительные ЛПД обеспечивают усиление в небольшой полосе частот, обычно не превышающей 10%. Ширина полосы пропускания зависит от выходной мощности и коэффициента усиления. По данным фирмы Hughes рабочая полоса ЛПД миллиметро-

вого диапазона с $P_{\text{вых}}=250 \dots 500$ мВт составляет 8,5% при $K_y=5$ дБ и 4% при $K_y=10$ дБ.

Коэффициент шума. Как уже отмечалось, ЛПД по коэффициенту шума уступают диодам Ганна и другим полупроводниковым СВЧ диодам и транзисторам. Значение коэффициента шума зависит от конструкции, используемого полупроводникового материала и режима работы ЛПД.

Кремниевые VARITT-диоды имеют наименьший $K_{\text{ш}}=10$ дБ на $f=10$ ГГц. В этом же диапазоне частот IMPATT-диоды на основе Si имеют $K_{\text{ш}}=30$ дБ, а на основе GaAs 20 дБ [204]. В миллиметровом диапазоне у кремниевых ЛПД типичные $K_{\text{ш}}=35$ дБ, а у арсенидогаллиевых $K_{\text{ш}}=32$ дБ. Лучшие экспериментальные образцы ЛПД этого диапазона, разработанные фирмой Hughes, имели $K_{\text{ш}}=27$ и 17 дБ соответственно. В связи с повышенным уровнем шума ЛПД применяются только в усилителях комбинированного типа, в которых на входе используются диоды Ганна или другие малошумящие приборы, а в выходных каскадах — ЛПД.

АМ и ЧМ шумы. Исследования шумов генераторных ЛПД на GaAs в диапазоне частот 26 ... 35 ГГц при $P_{\text{вых}}=10 \dots 100$ мВт показали, что уровень АМ шумов определяется плотностью входного тока диода и практически не зависит от добротности колебательной системы [201]. При этом двухполосный АМ шум в полосе 100 Гц на расстоянии от несущей 200 кГц при плотности входного тока 1,5 ... 4 кА/см² составил —126 ... 130 дБ.

Габариты и масса. Современные конструкции ЛПД имеют сравнительно небольшие габаритные размеры. Конструкция и размеры одного из стандартных корпусов ЛПД приведены на рис. 7.9. Для высокочастот-

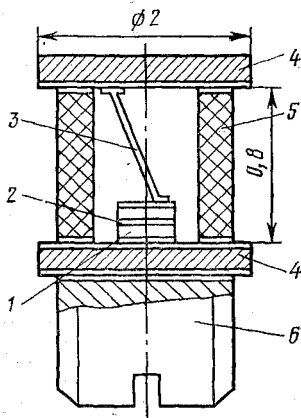


Рис. 7.9. Устройство одного из типовых корпусов ЛПД для частот до 18 ГГц (все соединяемые поверхности металлизированы под пайку): 1 — основание для крепления структуры; 2 — полупроводниковая структура; 3 — соединитель; 4 — коваровый диск; 5 — керамический цилиндр; 6 — медный штифт с резьбой

ных ЛПД с целью уменьшения паразитных реактивных емкостей применяются корпуса с меньшими размерами. Например, у корпуса Miniрак диаметр керамического цилиндра 0,84 мм, а его высота всего 0,3 мм. Масса диодов находится в пределах от нескольких десятых долей до единиц граммов.

В последнее время для повышения выходной мощности применяется параллельное соединение нескольких ЛПД, расположенных на одной подложке в общем корпусе. В этом случае конструкция и размеры корпуса выбираются в зависимости от числа используемых диодов и, естественно, несколько отличаются от стандартных типов корпусов.

Долговечность. Механизм отказов полупроводниковых диодов непосредственно связан с температурой перехода и определяется главным образом процессами электромиграции и короткими замыканиями. Долговечность ЛПД почти не зависит от рабочей частоты, так как температура перехода с ростом частоты повышается незначительно.

Судя по различным литературным источникам, средний срок службы ЛПД 5 тыс. ч. ... 3,3 млн. ч. [204, 224]. Наибольшее значение среднего времени наработки до отказа $3,3 \cdot 10^6$ ч получено в результате экстраполяции результатов испытаний в течение 7,7 тыс. ч кремниевых двухпролетных ЛПД на $f=14,6$ ГГц с $P_{\text{вых}}=0,8$ Вт при $\eta=15,1\%$ [224]. Эти диоды разработаны специально для спутниковой телеметрии с учетом обеспечения максимальной надежности работы. Для повышения надежности и обеспечения минимального теплового сопротивления в этих диодах применены хромо-платиново-золотые контакты и теплопроводы размером $0,1 \times 0,5 \times 0,5$ мм из электроосажденного золота или серебра.

7.5. ДИОДЫ ГАННА

Диоды Ганна были впервые созданы в 1963 г. [60]. В последующем были разработаны модификации диодов на эффекте переноса электронов, среди которых особый интерес представляют диоды с гашением доменов, ограничением накопления объемного заряда (ОНОЗ) и диоды, работающие в промежуточных (гибридных) режимах.

В отличие от туннельных, лавинно-пролетных и других диодов, свойства которых определяются процессами в $p-n$ -переходах, свой-

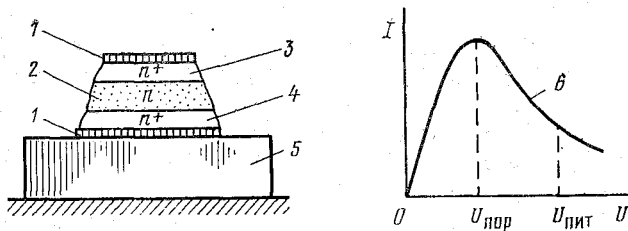


Рис. 7.10. Схематическое изображение структуры и ВАХ диодов Ганна:

1 — контактный слой (золото — индий — германий); 2 — активный слой (область дрейфа); 3, 4 — подложка; 5 — теплоотвод; б — область отрицательной проводимости

ства диодов Ганна характеризуются явлениями, возникающими в объеме однородного полупроводника с электронной проводимостью [14, 35]. Явление объемной отрицательной дифференциальной проводимости было обнаружено у ряда полупроводниковых соединений, в том числе у арсенида галлия и фосфида индия. Эти материалы и получили преимущественное применение в современных конструкциях диодов Ганна. Схематическое изображение структуры и ВАХ этих диодов приведены на рис. 7.10.

Принцип работы диодов Ганна состоит в следующем. При подведении к диоду постоянного напряжения, превышающего пороговое значение, в его катодной части образуются домены пространственного заряда. Эти домены под воздействием электрического поля проходят через область дрейфа к аноду. При этом в материале полупроводника возникают колебания с частотой, определяемой отношением средней скорости электронов к длине области дрейфа (толщине полупроводника). Например, при толщине полупроводника 10 мкм в нем возникают высокочастотные колебания с основной частотой 10 ГГц. Если поместить такой диод в резонатор, то на постоянное напряжение, приложенное к диоду, будет накладываться высокочастотное электрическое поле резонатора. Оно несколько модифицирует механизм образования доменов в диоде и изменяет частоту генерируемых колебаний. Перестройка частоты генерируемых колебаний такого генератора осуществляется в результате перестройки резонатора.

В режиме с гашением доменов движущиеся домены исчезают прежде, чем они доходят до анода. Это достигается при высокой добротности резонатора, когда амплитуда высокочастотных колебаний в резонаторе будет достаточно большой, или при увеличении рабочей частоты по сравнению с частотой, полученной в режиме пробега доменов.

Если рабочую частоту еще более увеличить, то диод начинает работать в режиме ОНОЗ. При этом на катоде диода в течение большей части периода колебаний образуется слой накопленного заряда, который затем рассасывается. В этом режиме практически не существует доменов, так как рабочая частота настолько велика, что они не успевают образоваться. Диод при этом приобретает

отрицательное сопротивление и частота генерации определяется только настройкой резонатора. Поскольку в режиме ОНОЗ частота не зависит от толщины полупроводника, эти диоды можно сделать толще, чем диоды для пролетного режима, и получить большую мощность. Диоды в режиме ОНОЗ позволяют получать колебания на более высоких частотах по сравнению с диодами, работающими в пролетных и доменных режимах.

Наряду с указанными режимами диоды Ганна могут использоваться в гибридном режиме, являющемся промежуточным между доменным и режимом ОНОЗ. В гибридных режимах диоды менее чувствительны к изменению нагрузки и других параметров внешней цепи и поэтому широко применяются на практике. Диоды Ганна используются для генерирования и усиления СВЧ колебаний, а также для переключения трактов и выполнения многих других функций преобразования информации.

В настоящее время известно около 400 типов промышленных и экспериментальных диодов Ганна, которые нашли применение в твердотельных СВЧ приборах различного назначения. На их основе создаются генераторы и усилители непрерывного и импульсного режимов, генераторы накачки параметрических усилителей, местные гетеродины приемных устройств и малозумящие входные усилители. Основные достижения, определяющие современный технический уровень развития этих диодов, характеризуются следующими данными.

Частота и мощность. Диоды Ганна созданы на $f = 1 \dots 94$ ГГц [206, 207]. В непрерывном режиме их $P_{\text{вых max}} = 1,4$ Вт на $f = 1 \dots 10$ ГГц, 0,5 Вт на $f = 20$ ГГц

Таблица 7.6

Основные параметры генераторных диодов Ганна непрерывного режима

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	η , %
MA4915	Microwave Ass.	4,4...5,0	1,0	2,4
MA49146	То же	5,9...6,4	1,0	2,3
MA49147	"	6,5...7,2	1,0	2,3
MA49148	"	7,1...7,9	1,0	2,0
Не известен	Fairchild	10,5	1,4	10,8
DGB6836G	Alpha Industries	8,0...12,4	0,5	2,5
DGB6843E	То же	26,5...40	0,25	2,5
DGB8648	"	40...60	0,1	2,3
Нет свед.	Plessey	31,5	0,25	4,6
То же	Hewlett — Packard	63,6	0,06	2,2
"	Bell Telephone Lab.	88	0,02	2,6

Основные параметры генераторных диодов Ганна
в импульсном режиме ОНОЗ

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{и}$, Вт	K_3 , %	η , %
Нет свед.	Cayuga Ass.	1,75	6000	0,001	15
TEP023	Plessey Optoelectronic	4...8	30	—	—
Нет свед.	Cayuga Ass.	7,0	2000	0,0006	5
Нет свед.	Standart Telecommunica- tion Lab.	9,3	250	—	10
MA49265	Microwave Ass.	8...12	5	—	—
TEP011	Plessey Optoelectronic	12...18	30	—	—
Нет свед.	Standart Telecommunica- tion Lab.	18	2000	—	10
TEP032	Plessey Optoelectronic	18...26	5	—	—
TEP041	То же	26...40	1	0,001	4
Нет свед.	BeLL Telephon Lab.	50	0,4	0,001	9
Нет свед.	Hewlett — Packard	64	0,14	5,0	3,7

и 0,25 Вт на $f=30$ ГГц. На частотах более 30 ГГц $P_{вых}=20 \dots 100$ мВт (см. рис. 7.1 и табл. 7.6).

Диоды Ганна импульсного режима работают на $f=1,75 \dots 64$ ГГц. Наибольшая выходная мощность в импульсе получена на $f=1,75$ ГГц. Она составляет 6 кВт при $K_3=10^{-5}$ и $\eta=10\%$. На частотах до 10 ГГц импульсная мощность составляет 1...2 кВт, 200 Вт на $f \approx 20$ ГГц и несколько сотен милливатт на частотах до 64 ГГц (см. рис. 7.2 и табл. 7.7). Достигнутые в настоящее время на импульсных диодах выходные мощности еще далеки от теоретического предела, который, по мнению зарубежных специалистов, оценивается в 10^3 кВт на $f=12 \dots 18$ ГГц и 10 кВт на $f \approx 100$ ГГц [60].

Выходная мощность диодов Ганна существенно зависит от теплового режима их работы. При очень малых размерах диодов и большой удельной рассеиваемой мощности особое значение приобретает способ отвода тепла от активного слоя. Наиболее эффективными мерами улучшения теплоотвода являются применение алмазных теплопроводов, а также улучшение теплового контакта между активным слоем и теплопроводом. По мнению специалистов фирмы Hitachi, применение алмазного теплопровода, теплопроводность которого в 2,5...3 раза больше медного, может обеспечить 2-кратное увеличение выходной мощности диода [195].

Выходную мощность генераторов на диодах Ганна можно повысить также в результате параллельного или последовательного включения нескольких диодов, в том числе изготовленных в одной структуре. При параллельном включении диодов хотя и не достигается арифметического сложения мощностей каждого из них, однако общая выходная мощность может быть существенно повышена. Так, например, при параллельном включении четырех диодов с $P_{\text{вых}}=0,6 \dots 0,9$ Вт на $f=12,4 \dots \dots 13$ ГГц суммарная мощность на $f=12,8$ ГГц составила 2,1 Вт [196]. Имеются также примеры последовательного включения диодов, изготовленных в одной структуре. В частности, фирмой RCA была изготовлена структура из двух диодов ($n^+ - n - n^+ - n - n^+$), обеспечивающая в импульсном режиме на $f=4$ ГГц $P_{\text{н}}=13,5$ Вт при $\eta=13,5\%$.

КПД. Самые высокие КПД диодов Ганна получены на $f=1 \dots 10$ ГГц. С увеличением частоты КПД диодов значительно снижается (см. рис. 7.3). При работе в непрерывном режиме максимальные КПД= $10 \dots 12\%$ на $f < 20$ ГГц, $5 \dots 6\%$ на $f < 40$ ГГц и $2 \dots 3\%$ на $f = 90$ ГГц. Импульсные диоды Ганна в доменном режиме имеют $\eta \approx 30\%$ на $f=1 \dots 10$ ГГц, 20% на $f=20 \dots \dots 30$ ГГц. Использование режима ОНОЗ позволяет повысить КПД диодов в миллиметровом диапазоне.

Снижение КПД диодов в непрерывном режиме связано главным образом с ухудшением условий отвода тепла. Поэтому меры, принимаемые для повышения мощности за счет улучшения теплоотвода, обеспечивают одновременно и некоторое повышение КПД. Эффективность работы диодов можно повысить, если принять меры по достижению оптимальной подстройки внешней цепи не только на первую гармонику, но и на более высокие гармонические составляющие колебаний, возникающих в диодах. На диодах Ганна в режиме ОНОЗ с помощью подстройки на первую и вторую гармоники генераторов удалась повысить КПД в 1,5 раза [199].

Перестройка частоты. Диоды Ганна сохраняют отрицательное сопротивление в широкой полосе частот. Для диодов из GaAs при работе в доменном режиме рабочая полоса частот может быть равна октаве, а для диодов из фосфида индия — более октавы. Такая ширина полосы рабочих частот не является предельной. Ее можно еще расширить, если применить катодный контакт

с барьером Шоттки. В этом случае отрицательное сопротивление диодов поддерживается в полосе частот, занимающей несколько октав.

Реализация указанных возможностей зависит от применяемых способов перестройки частоты внешних резонаторов. Известно много технических решений по обеспечению электрической и механической перестройки резонаторов. Наиболее широкое применение для электрической перестройки частоты генераторов Ганна получили варакторы и монокристаллы железо-иттриевого граната (ЖИГ), резонансная частота которых изменяется с помощью электромагнита.

ТКЧ. Значение ТКЧ диодов Ганна определяется температурными зависимостями ВАХ полупроводника и контактных соединений. ТКЧ диодов из GaAs на $f = 2 \dots 10$ ГГц лежит в пределах от $-0,5$ до -2 МГц/°С [197]. У диодов в режиме ОНОЗ в этом же диапазоне частот ТКЧ достигает 4 МГц/°С [196]. Довольно значительные изменения частоты диодов Ганна при изменении температуры окружающей среды являются некоторым ограничением их применения в отдельных видах РЭА. Однако этот недостаток устраняется при применении резонаторов с термокомпенсацией и специальных стабилизирующих схем.

АМ и ЧМ шумы. Генераторные диоды Ганна обладают очень малыми АМ и ЧМ шумами и поэтому являются перспективными приборами для создания гетеродинов и генераторов накачки. АМ шум при работе с двумя боковыми полосами и сдвиге от несущей на 5 кГц в полосе шириной 100 Гц оценивается значением -140 дБ. ЧМ шум при сдвиге от несущей на 10 кГц в полосе частот 70 Гц составляет -40 дБ при добротности резонатора $Q=100$ и -70 дБ при $Q=1000$. По уровню АМ и ЧМ шумов диоды Ганна практически не уступают отражательным клистродам [202].

Коэффициент усиления. Диоды Ганна используются также для усиления СВЧ колебаний. В зависимости от профиля легирования и частоты обычно $K_v=6 \dots 15$ дБ. Произведение коэффициента усиления на полосу пропускания оценивается значениями 2 ... 13 ГГц. В последнее время диоды Ганна стали широко применяться в маломощных усилителях миллиметрового диапазона. В частности, фирмой Varian выпускаются широкополосные маломощные усилители на $f=18 \dots 26$ и $26 \dots$

... 40 ГГц. В этих усилителях использованы диоды с $K_y=6$ дБ и $K_{ш}$ не более 17 дБ [52].

Коэффициент шума. Усилительные диоды Ганна среди других полупроводниковых приборов миллиметрового диапазона обладают наименьшими шумами. По чувствительности усилители на диодах Ганна приближаются к усилителям на туннельных диодах, превосходя их на несколько порядков по выходной мощности.

По теоретическим оценкам минимальные значения коэффициента шума диодов Ганна при использовании GaAs составляют 6 ... 7 дБ, а фосфида индия — 4 ... 5 дБ [52].

Однако лучшие значения коэффициента шума, достигнутые практически на экспериментальных образцах диодов Ганна из GaAs, составляют 10,5 дБ на $f=11$ ГГц и 16,2 дБ на $f=33$ ГГц, а диодов из фосфида индия — 9,2 дБ на $f=11$ ГГц, 10,7 дБ на $f=14$ ГГц и 7,5 дБ на $f=33$ ГГц [205]. Как видно из приведенных данных, диоды Ганна из фосфида индия по коэффициенту шума составляют серьезную конкуренцию арсенидо-галлиевым диодам и по мере завершения разработки технологии их изготовления займут достойное место среди маломощных СВЧ приборов.

Габариты и масса. Диоды Ганна изготавливаются в нескольких конструктивных вариантах, которые сводятся к двум основным разновидностям: типа «сэндвич» и планарной. Структуры типа «сэндвич» применяются при изготовлении диода в дискретном исполнении (см. рис. 7.10). Габаритные размеры наиболее распространенных конструкций диодов Ганна приведены на рис. 7.11. Масса этих диодов находится в пределах от одного до

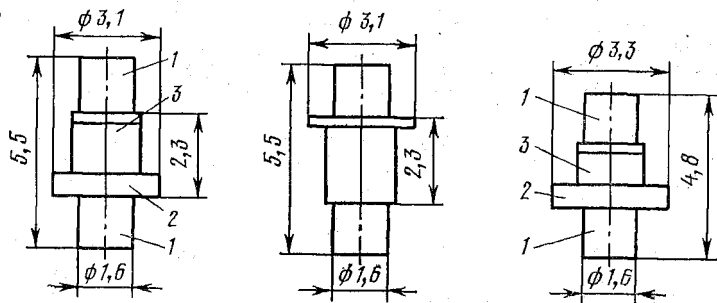


Рис. 7.11. Габаритные размеры диодов Ганна различной конструкции: 1 — выноски; 2 — теплоотвод; 3 — керамический корпус

нескольких граммов. Планарные структуры привлекательны тем, что они обеспечивают возможность изготовления приборов методами интегральной технологии и создания монолитных СВЧ интегральных схем [198].

Долговечность. Среднее время безотказной работы диодов Ганна при их качественном изготовлении и хорошем отводе тепла достигает 100 тыс. ч и более [200].

7.6. СВЧ ТРАНЗИСТОРЫ

Успехи, достигнутые в совершенствовании технологии изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем (ионное легирование, электронно-лучевая литография и др.), позволили существенно расширить рабочий диапазон транзисторов в сторону сверхвысоких частот [3].

Большое внимание, которое уделяется продвижению транзисторов в коротковолновую область сантиметрового диапазона, объясняется тем, что они обладают рядом преимуществ перед используемыми в этом диапазоне двухполюсными полупроводниковыми приборами. По сравнению с туннельными, лавинно-пролетными, параметрическими диодами и диодами Ганна транзисторы имеют более высокой КПД, меньший коэффициент шума, широкий диапазон перестройки (широкую полосу пропускания), большой динамический диапазон и обеспечивают хорошую развязку входной и выходной цепей. В настоящее время известны две конструктивные разновидности СВЧ транзисторов: биполярные и полевые (канальные).

Биполярные транзисторы

Биполярными называются транзисторы, в которых ток обусловлен движением основных и неосновных носителей электрического заряда. Устройство этих транзисторов показано на рис. 7.12. Принцип работы биполярных транзисторов заключается в следующем [36]. При небольшом положительном напряжении, приложенном к эмиттерному $p-n$ -переходу, электроны преодолевают потенциальный барьер и проникают в область базы и коллекторного $p-n$ -перехода. Наибольшая часть электронов под воздействием большого отрицательного напряжения попадает в область коллектора, уменьшает обратное сопротивление перехода и вызывает ток коллектора. Небольшая часть электронов, проходя область базы, рекомбинирует с дырками и создает ток базы. При этом ток коллектора значительно больше тока базы.

Это свойство транзисторов используется для генерации и усиления СВЧ колебаний. Для этой цели ко входу и выходу транзи-

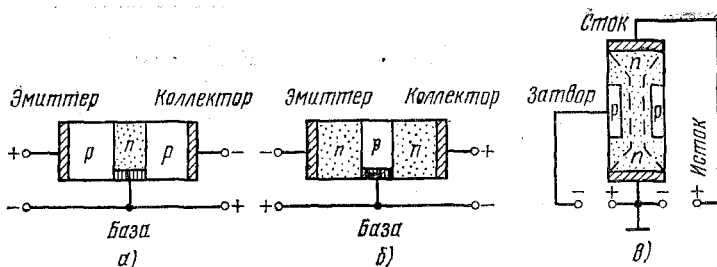


Рис. 7.12. Схематическое изображение структур биполярных $p-n-p$ (а), $n-p-n$ (б) и полевых (в) СВЧ транзисторов

стора подключаются колебательные системы и соответствующие источники питания. В биполярных транзисторах в качестве полупроводника используются Ge и Si. В современных конструкциях этих транзисторов применяется преимущественно Si, который обеспечивает их более высокие технические и эксплуатационные характеристики. Биполярные транзисторы широко применяются в различной аппаратуре в качестве местных гетеродинов, в передатчиках импульсного и непрерывного действия, в маломощных усилителях и усилителях мощности импульсного и непрерывного режимов.

За рубежом создано большое число (более 800) типов биполярных транзисторов, технический уровень которых характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Существующие биполярные СВЧ транзисторы работают на частотах до 10 ГГц. По выходной мощности они подразделяются на маломощные (менее 1 Вт) и мощные (более 1 Вт). Наибольшее количество биполярных транзисторов создано для работы в дециметровом диапазоне. Большое внимание уделяется созданию мощных транзисторов на сантиметровый диапазон [73]. К настоящему времени максимальная выходная мощность биполярных транзисторов в непрерывном режиме составляет 310 Вт на $f=1$ ГГц, 20 Вт на $f=3$ ГГц, 1,6 Вт на $f=8$ ГГц и 1,0 Вт на $f \approx 10$ ГГц (см. рис. 7.1). Основные параметры наиболее мощных биполярных транзисторов приведены в табл. 7.8.

Большие мощности получены также при работе транзисторов в импульсном режиме. Так, например, фирмой Power Hybrids созданы биполярные транзисторы на $f=1,09$ ГГц с $P_{н}=350$ Вт при $U_{к}=70$ В [248]. Фирмой TRW на этой же частоте получена $P_{н}=320$ Вт при $K_{у}=8$ дБ и $U_{к}=50$ В. Транзистор, разработанный этой фирмой, содержит полупроводниковую структуру из

Таблица 7.8

Основные параметры наиболее мощных биполярных СВЧ транзисторов в непрерывном режиме

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$ Вт	$K_{\text{у}}$ дБ	η , %
C2M100—28	Communications Transistor Co.	0,4	180	8	57
FJ0780—28	Fujitsu Ltd.	0,77	75	5	65
M0912B250Y	R. T. C. La Radiotechnique — Compeles	1,0	310	6,4	37
PH1350	Power Hybrids	1,3	50	10	—
NEM2020	Nippon Electric Co.	2,0	20	5,5	45
Нет свед.	Power Hybrids	3,0	15	5	—
MSC4005	Microwave Semiconductor	4,0	5	4	30
NEM4205	Nippon Electric Co.	4,2	5	4	25
Нет свед.	Microwave Semiconductor	6,5	5	—	—
Нет свед.	Fujitsu Ltd.	8,0	1,6	—	—
Нет свед.	Texas Instruments	10,0	1	6	26

60 ячеек, размещенных на одной подложке размерами $6 \times 0,9$ мм [207].

Ожидается, что в 1980 г. мощность биполярных транзисторов в непрерывном режиме увеличится до 2 Вт на $f=8$ ГГц, 1,2 Вт на $f=10$ ГГц и 0,7 Вт на $f=12$ ГГц (см. рис. 8.1). Наряду с повышением мощности и частотного предела при разработке транзисторов важнейшими проблемами остаются: повышение надежности работы мощных приборов, согласование их сопротивлений с СВЧ трактом, защита приборов от изменения сопротивления нагрузки и улучшение отвода тепла.

Для согласования сопротивлений транзисторов с СВЧ трактом ряд фирм выпускает приборы (модули) с встроенными согласующими элементами. Например, фирма TRW выпустила серию транзисторов, у которых МОП конденсаторы располагаются очень близко к выводу базы для компенсации индуктивной составляющей, благодаря чему обеспечивается чисто активное входное сопротивление прибора. Фирма MSC выпускает серию транзисторов на $f=0,9 \dots 4,2$ ГГц, предназначенных для непосредственного включения в пятидесятиомную микрополосковую линию передачи. Согласование сопротивлений этих транзисторов производится с помощью шести встроенных реактивных элементов — индуктивностей и емкостей.

Для улучшения теплоотвода фирма Texas Instruments разработала технологию изготовления приборов с гребенчатой эмиттерной структурой и двойным слоем металлизации.

КПД. Отличительной особенностью транзисторов по сравнению с другими полупроводниковыми СВЧ приборами является высокая эффективность преобразования энергии постоянного тока в энергию СВЧ. КПД мощных биполярных транзисторов достигает 65 ... 70% на $f \leq 1$ ГГц, 50% на $f=4$ ГГц и около 30% на $f=10$ ГГц (см. рис. 7.3). Такие же высокие КПД получены на транзисторах в импульсных режимах. Например, у мощных биполярных транзисторов фирмы MSC на $f=1,9 \dots 2,0$ ГГц и $P_{и}=70$ Вт η достигает 70%.

Коэффициент усиления. Биполярные транзисторы по сравнению с полупроводниковыми СВЧ диодами обладают небольшим усилением. У большинства маломощных транзисторов $K_{у}=5 \dots 13$ дБ, а у мощных 3 ... 10 дБ. При этом минимальные значения относятся к транзисторам, работающим на частотах выше 4 ГГц. Примером приборов с максимальным усилением являются биполярные транзисторы NE64580, изготавливаемые фирмой NEC на $f=0,5 \dots 6$ ГГц. У этого транзистора на $f=2$ ГГц $K_{у}=13$ дБ при $K_{ш}=2$ дБ.

Коэффициент шума. Биполярные транзисторы позволяют создавать маломощные усилители на $f=0,3 \dots 10$ ГГц. До разработки полевых транзисторов они были единственными 3-электродными маломощными приборами и наиболее доступными для широкого применения в различных приемных устройствах. Минимальный коэффициент шума биполярных транзисторов в настоящее время составляет 1,3 дБ на $f=1$ ГГц и менее, 2 дБ на $f=3$ ГГц, 3,5 дБ на $f=5$ ГГц и 7 дБ на $f=8$ ГГц [73]. Эти транзисторы уступают по минимальному коэффициенту шума только параметрическим усилителям и полевым транзисторам. Однако с появлением и развитием полевых транзисторов основным назначением биполярных транзисторов становится использование их при создании маломощных и мощных генераторов и усилителей мощности.

Для изготовления мощных транзисторов на $f > 10$ ГГц применяют многоячейстые структуры. При этом два или более кристаллов соединяются в одном транзисторном корпусе.

Полевые транзисторы

Полевыми, или униполярными, называются транзисторы, в которых ток создается только основными носителями. Полевой транзистор в простейшем виде представляет пластинку полупроводника n -типа (или p -типа), у которой на больших гранях имеются слои p -типа (или n -типа) (рис. 7.12). Эти слои соединены между собой и образуют единый электрод (затвор). На торцах пластины размещены другие электроды, один из которых называется истоком, а другой — стоком [37].

Принцип действия полевого транзистора состоит в том, что при изменении напряжения затвора меняется эффективная ширина канала и соответственно ток в цепи исток — сток. Входное сопротивление цепи исток — затвор довольно большое, так как p — n -переходы работают в противоположных направлениях. Поэтому для управления значением тока в транзисторе требуются входные сигналы, мощность которых во много раз меньше выходной мощности в цепи исток — сток. Это свойство полевого транзистора используется для генерации и усиления СВЧ колебаний. Частотный предел этих транзисторов ограничивается возможностью создания электродов, особенно затвора, с предельно малыми размерами, измеряемыми единицами и долями микрона.

В качестве полупроводниковых материалов в полевых транзисторах используются Si и GaAs. Арсенид галлия, характеризующийся более высокой подвижностью носителей (в 4 ... 5 раз большей, чем у Si), является наиболее перспективным материалом для СВЧ транзисторов. В последнее время за рубежом исследуется возможность применения фосфида индия, который из-за большой скорости насыщения может обеспечить увеличение предельной частоты транзисторов [49, 50]. Полевые транзисторы получают все более широкое применение в различной РЭА в качестве маломощных усилителей, усилителей мощности непрерывного режима и в передатчиках импульсного и непрерывного действия. Технический уровень созданных и готовящихся к серийному выпуску полевых транзисторов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Создание полевых транзисторов на GaAs позволило значительно расширить рабочий диапазон частот в сторону более высоких частот. В настоящее время известно около 60 типов этих транзисторов

на $f=2 \dots 21$ ГГц. Зарубежные специалисты считают, что использование арсенида галлия и фосфида индия, а также уменьшение размеров затворов в результате применения электронно-лучевой литографии позволит создать транзисторы на частоты до 30 ГГц [266]. Полевые транзисторы начинают конкурировать с биполярными не только как малошумящие приборы, но и как мощные усилители. Фирмами Fujitsu, RCA, Westinghouse и Plessey созданы полевые транзисторы из GaAs, выходная мощность которых на $f > 8$ ГГц больше мощности имеющихся кремниевых биполярных транзисторов [100]. Лучшие образцы этих транзисторов имеют $P_{\text{вых}}=2,7$ Вт на $f=6$ ГГц и 2,2 Вт на $f=8$ ГГц, 1 Вт на $f=10$ ГГц и 0,2 Вт на $f=21$ ГГц (см. рис. 7.1).

Коэффициент усиления. Полевые транзисторы, так же как биполярные, обеспечивают сравнительно небольшое усиление. Их коэффициент усиления в зависимости от рабочей частоты составляет 4 ... 10 дБ, причем наибольшее значение относится к транзисторам, работающим на $f < 8$ ГГц [73].

Зарубежными фирмами продолжают работы по дальнейшему совершенствованию конструкции и технологии изготовления полевых транзисторов, в результате которых ожидается расширение их частотных пределов и повышение коэффициента усиления. Так, например, фирма Nirron Electric Co. за счет уменьшения ширины затвора до 0,5 мкм повысила коэффициент усиления полевых транзисторов из GaAs до 15 дБ на $f=4$ ГГц и до 10 дБ на $f=12$ ГГц [232].

Фирмой RCA разработан новый тип полевого СВЧ транзистора на GaAs, основанный на эффекте Ганна. Новый прибор имеет эпитаксиальную структуру и известен как транзистор бегущей волны. По своей структуре он идентичен двухвентильному полевому транзистору. Среднее значение усиления этого прибора составляет 12 дБ, $P_{\text{вых}}=0,2$ мВт на $f=8 \dots 18$ ГГц [241]. Эта фирма продолжает разработку подобных транзисторов в диапазоне 8 ... 16 ГГц с целью увеличения коэффициента усиления и повышения выходной мощности до 50 мВт.

Коэффициент шума. Среди полевых транзисторов особое положение занимают малошумящие транзисторы. Повышенный интерес к этим приборам вызван чрезвычайно малым уровнем собственных шумов. Современные конструкции полевых транзисторов обеспечивают полу-

Таблица 7.9

Основные параметры малошумящих полевых транзисторов на GaAs

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	K_y , дБ	$K_{ш}$, дБ
NE244	Nippon Electric Co.	4	—	1,5
		8	—	3,0
NE388	То же	8	—	2,5
		14	—	4,0
Нет свед.	"	4	15,2	1,15
GAT5	Plessey Optoelectronic	8	12,0	1,7
HFET220	Hewlett — Packard	10	9,2	2,8
2SK124 ¹⁾	Nippon Electric Co.	12	13	3,0
Нет свед.	Avantek	14	8	4,0
Нет свед.	Plessey Optoelectronic	8	—	3,0
		12	—	4,5

¹⁾ Предельная частота этого транзистора по данным фирмы составляет 80 ГГц.

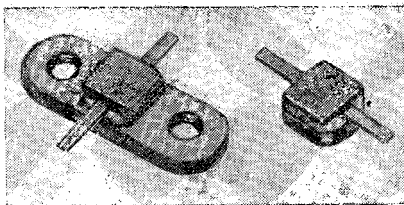
чение $K_{ш}$ в пределах от 1,1 дБ на $f=4$ ГГц до 5 дБ на $f=18$ ГГц. Указанные значения превышают лучшие достижения, полученные на кремниевых биполярных транзисторах и сверхмалошумящих ЛБВ. Параметры отдельных типов малошумящих полевых транзисторов на GaAs приведены в табл. 7.9.

Коэффициент шума полевых транзисторов ежегодно снижается с освоением новых технологических процессов, связанных с применением ионной имплантации, вакуумного осаждения и эпитаксии электронным лучом. Фирма Avantek, используя метод ионной имплантации, создала образцы транзисторов с $K_{ш}=2,5$ дБ на $f=18$ ГГц. Фирмой Nippon Electric Co. созданы аналогичные транзисторы, которые на $f=12$ ГГц имеют $K_{ш}=2,1$ дБ. Фирмой Bell Telephone Lab. разработаны экспериментальные образцы транзисторов с применением метода выкуumnого осаждения. На $f=4$ ГГц они имеют рекордно низкий $K_{ш}=0,73$ дБ [250].

Имеются также примеры использования для этих целей молекулярно-лучевой эпитаксии. Фирма Varian, например, на основе этой технологии выпустила новые полевые транзисторы с барьером Шоттки, которые имеют $K_y=12$ дБ и $K_{ш}=2,2$ дБ на $f=8$ ГГц [255].

Полевые транзисторы на GaAs широко применялись в качестве активных элементов малошумящих СВЧ уси-

Рис. 7.13. Внешний вид полевых транзисторов типа MS C88004 на GaAs



лителей на $f=0,5 \dots 18$ ГГц, обладающих малой выходной мощностью. Однако сейчас зарубежные фирмы начали рекламировать полевые транзисторы с повышенной выходной мощностью. Фирма Microwave Semiconductor Co. рекламирует серию мощных широкополосных полевых транзисторов на $f=2 \dots 10$ ГГц с $P_{\text{вых}}=0,2; 0,4; 0,8$ и 1 Вт. Наиболее совершенный прибор этой серии MSC88004 обеспечивает на $f=8$ ГГц $P_{\text{вых}}=1$ Вт и $K_{\gamma}=7,5$ дБ [232]. Эти транзисторы изготавливаются в металлокерамических корпусах, удобных для монтажа в гибридных микрополосных схемах. Корпус имеет два варианта конструкции: с фланцем и в виде таблетки (рис. 7.13).

Для улучшения теплоотвода, сведения к минимуму значений паразитных электрических параметров и увеличения долговечности этих транзисторов кристаллы монтируются в корпусе активной поверхностью вниз. Полевые транзисторы имеют большую долговечность. Среднее время наработки на отказ оценивается, например, фирмой Nippon Electric Co. значениями $10^6 \dots 10^8$ ч. Однако одной из наиболее слабых сторон полевых транзисторов является их недостаточная долговременная стабильность параметров. Для этих приборов особенно неприятен дрейф параметров, сопровождающийся увеличением коэффициента шума и уменьшением усиления.

7.7. ПОЛЕВЫЕ СВЧ ТЕТРОДЫ

Дальнейшим развитием полевых транзисторов явилось создание дузатворных полевых транзисторов — полевых тетродов. Эти приборы имеют два параллельно расположенных управляющих электрода (затвора), помещенных между истоком и стоком. Они обычно включаются по схеме с общим истоком. При этом входной сигнал подводится к первому затвору, а выходной снимается со стока и истока. На второй затвор подается

управляющее напряжение, с помощью которого можно регулировать коэффициент усиления прибора [37]. В качестве полупроводникового материала используется также GaAs.

Полевые тетроды по сравнению с транзисторами обладают повышенными функциональными возможностями и обеспечивают большее усиление. Введение второго затвора способствует уменьшению обратной связи между входом и выходом и обеспечивает повышенную стабильность работы прибора. Полевые тетроды могут использоваться в качестве малошумящих усилителей с регулируемым усилением, быстродействующих импульсно-амплитудных модуляторов и ключевых устройств с модуляцией несущей смещением фазы или частоты. Они широко применяются в самых разнообразных электронных системах: бытовых цветных телевизорах, частотно-модулированных моно- и стереофонических приемниках, связной, радиорелейной и спутниковой СВЧ аппаратуре.

Созданные к настоящему времени промышленные образцы тетродов характеризуются следующими данными.

Частота и мощность. Полевые тетроды работают в диапазоне частот от УВЧ до 10 ГГц. Все эти приборы являются малошумящими усилителями с выходной мощностью до 10 мВт [249]. Лучшим среди наиболее высокочастотных приборов является полевой тетрод, разработанный фирмой Hewlett—Packard. Он обеспечивает на

Таблица 7.10

Основные параметры полевых СВЧ тетродов [51]

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	K_y , дБ	$K_{ш}$, дБ	D , дБ
3SK36K	Matsushita Electronics	0,2	23	3,5	—
SD-3C0	Signetics Corp.	0,5...1,0	13	8,0	—
3SK48	Sony	0,8	—	2,3	—
Нет свед.	Hitachi	1,25...2,05	18±0,5	—	35
Нет свед.	"	4	12 (9,1)	4,5 (3,1)	40
Нет свед.	Plessey	5	12	—	—
Нет свед.	Hewlett — Packard	10	18 (13)	7,4 (4,0)	44

Примечание. В скобках приведены значения параметров тетродов в режимах, оптимизированных по коэффициенту шума.

$f=10$ ГГц максимальный $K_y=18$ дБ и минимальный $K_{ш}=4$ дБ (при усилении 13 дБ). Выходная мощность этого прибора составляет 10 мВт при уменьшении усиления на 1 дБ [249].

Коэффициент усиления. Наличие второго затвора у полевых тетродов позволяет регулировать их коэффициент усиления и выбирать оптимальные режимы приборов для получения наибольшего усиления или наименьшего шума. Регулировка усиления этих приборов осуществляется изменением напряжения на втором затворе. Например, у полевого тетрода на 5 ГГц фирмы Plessey для регулировки усиления от 0 до 12 дБ достаточно изменить напряжение на втором затворе в пределах 4 ... 2,5 В [195]. Основные параметры отдельных типов полевых СВЧ тетродов на GaAs приведены в табл. 7.10. Как видно из этой таблицы, полевые СВЧ тетроды в режиме максимального усиления имеют $K_y=12 \dots 18$ дБ. При настройке приборов на минимальные шумы их коэффициент усиления снижается до 9 ... 13 дБ, что также является вполне достаточным для пренебрежения шумами, вносимыми последующими каскадами приемного устройства. Указанные значения коэффициента усиления полевых тетродов намного выше величин, достигнутых с помощью полевых транзисторов соответствующего диапазона частот.

Коэффициент шума. Минимальный коэффициент шума полевых тетродов в СВЧ диапазоне составляет 3,5 дБ на $f=1$ ГГц, 3 дБ на $f=4$ ГГц и 4 дБ на $f=10$ ГГц.

Динамический диапазон. Полевые тетроды позволяют управлять усилением в динамическом диапазоне $D=35 \dots 44$ дБ. Причем изменение усиления в этом диапазоне может осуществляться за время менее 70 пс.

Быстрое развитие полевых СВЧ тетродов связано с успехами в технологии изготовления этих приборов и стимулируется широкими возможностями их применения в РЭА.

Глава 8

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ ГЕНЕРАТОРЫ

Успехи в создании промышленных образцов ЛПД, диодов Ганна, биполярных и полевых транзисторов открыли широкие возможности для конструирования раз-

личных СВЧ приборов и устройств и, в первую очередь, твердотельных генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Эти генераторы предназначены для замены отражательных клистронов, ламп обратной волны 0-типа и других маломощных электровакуумных СВЧ приборов [3, 21, 22, 38].

Твердотельные СВЧ генераторы, обладая существенными преимуществами перед электровакуумными приборами аналогичного назначения по габаритным размерам и массе, потребляемой мощности, долговечности и лучшей совместимости с микросхемами, получают все более широкое распространение в современной РЭА. Они применяются в качестве гетеродинов, генераторов накачки параметрических усилителей и маломощных передатчиков в аппаратуре радио и радиорелейной связи, доплеровских и импульсных РЛС, радиотехнической разведки и радиопротиводействия, тревожной сигнализации, измерительной технике и во многих других областях науки и техники.

В настоящее время за рубежом разрабатываются и выпускаются три вида СВЧ генераторов, основанных на применении трех различных активных элементов: ЛПД, диодов Ганна и транзисторов. Каждый из этих генераторов обладает определенными преимуществами и имеет некоторые недостатки. Например, генераторы на диодах Ганна имеют самый низкий КПД и наименьшую выходную мощность, зато обладают широким диапазоном перестройки, малым уровнем шумов и низкими значениями рабочего напряжения. Генераторы на ЛПД, наоборот, характеризуются наибольшим диапазоном электрической перестройки частоты, высоким уровнем шумов и более высоким рабочим напряжением. Генераторы на транзисторах имеют ограниченный рабочий диапазон частот, но обладают высоким КПД, большой выходной мощностью и широкой перестройкой частоты в дециметровом диапазоне.

Имеющиеся полупроводниковые СВЧ приборы обеспечивают создание твердотельных генераторов с максимальной $P_{\text{вых}}=50 \dots 310$ Вт на $f=0,3 \dots 1$ ГГц, $30 \dots 50$ Вт на $f=1 \dots 3$ ГГц, $10 \dots 30$ Вт на $f=3 \dots 10$ ГГц, около 1 Вт на $f=30$ ГГц и около 0,1 Вт на $f=100$ ГГц (рис. 8.1). Наибольшую выходную мощность на $f=3$ ГГц обеспечивают генераторы на биполярных транзисторах, а на более высоких частотах — генераторы

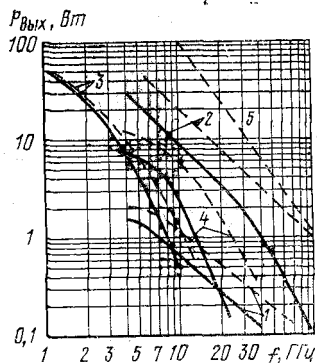


Рис. 8.1. Максимальные значения выходной мощности существующих (сплошные линии) и прогнозируемых (штриховые линии) твердотельных СВЧ генераторов на:

1 — диодах Ганна; 2 — ЛПД; 3 — биполярных транзисторах; 4 — полевых транзисторах; 5 — теоретический предел для твердотельных приборов

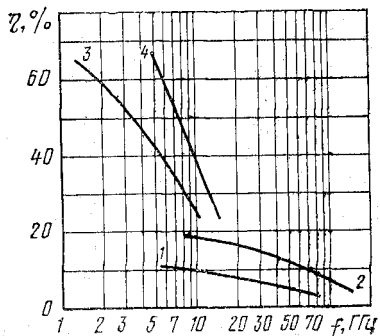


Рис. 8.2. Максимальные значения КПД твердотельных СВЧ генераторов на:

1 — диодах Ганна; 2 — ЛПД; 3 — биполярных транзисторах; 4 — полевых транзисторах

на ЛПД. С учетом прогнозируемых к 1980 г. значений максимальной выходной мощности предельные частоты генераторов на биполярных транзисторах составят 10 ... 12 ГГц, на полевых транзисторах — до 40 ГГц, на диодах Ганна — 70 ... 80 ГГц и на ЛПД — более 100 ГГц [51].

Несмотря на то, что имеющиеся возможности по расширению частотных пределов и повышению мощности еще не полностью реализованы в промышленных конструкциях твердотельных СВЧ генераторов, тем не менее существующие генераторы этого типа по своим параметрам не уступают отражательным клистронам, ЛОВО, митронам и другим электровакуумным СВЧ приборам малой и средней мощности. Твердотельные СВЧ генераторы не только не уступают, но и значительно превосходят указанные электровакуумные СВЧ приборы по эффективности работы (значениям КПД). Максимальные значения КПД твердотельных СВЧ генераторов, полученные на различных полупроводниковых приборах, показаны на рис. 8.2. КПД генераторов на ЛПД и диодах Ганна значительно меньше, чем у генераторов на транзисторах, однако их КПД все же превышает значения,

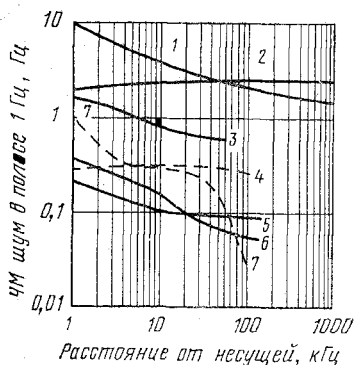


Рис. 8.3. Характеристики ЧМ шумов твердотельных СВЧ генераторов 3-см диапазона на: 1 — кремниевом IMPATT-диоде ($P_{\text{вых}}=350$ мВт); 2 — арсенидо-галлиевом IMPATT-диоде (350 мВт); 3 — VARITT-диоде (10 мВт); 4 — отражательном клистроне (130 мВт); 5 — транзисторе с умножением частоты (20 мВт); 6 — диоде Ганна (40 мВт); 7 — ЛОВО

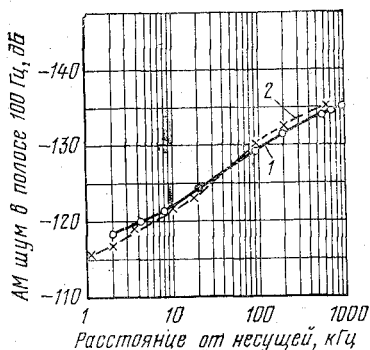


Рис. 8.4. Зависимость АМ шумов генераторов на IMPATT-диодах от расстояния до несущей:

1 — на Si-многослойном диоде на $f \approx 40$ ГГц с $P_{\text{вых}}=370$ мВт; 2 — на GaAs-диоде на $f \approx 30$ ГГц с $P_{\text{вых}}=100$ мВт

имеющиеся у соответствующих по частоте и мощности отражательных клистронов и ЛОВО.

Важнейшими характеристиками СВЧ генераторов являются уровни ЧМ и АМ шумов. Данные сравнительной оценки СВЧ генераторов по уровню ЧМ шумов на $f \approx 10$ ГГц приведены на рис. 8.3. Как видно из графиков, генераторы на транзисторах и диодах Ганна по уровню ЧМ шумов не уступают отражательным клистронам и ЛОВО. Уровень шумов генераторов на ЛПД более чем на порядок выше шумов транзисторных генераторов [53]. Применение различных схем стабилизации частоты твердотельных СВЧ генераторов может обеспечить дальнейшее снижение ЧМ шума до значений, достигнутых на двухрезонаторных клистронах с внешней стабилизацией. Твердотельные СВЧ генераторы обладают примерно таким же уровнем АМ шумов, как и отражательные клистроны и ЛОВО. Об уровне этих шумов можно судить по данным, приведенным на рис. 8.4 для генераторов миллиметрового диапазона на ЛПД [53].

При конструировании твердотельных СВЧ генераторов разработчиками используются два основных принципа. Первый основан на применении обычных волно-

водных СВЧ узлов и корпусных полупроводниковых приборов, а второй — на использовании гибридно-пленочных схем, микрополосковых линий и бескорпусных полупроводниковых приборов. Наибольшее признание получили СВЧ интегральные схемы полосковой конструкции на керамической или ситалловой подложке [60]. Примером подобных приборов может служить серия тонкопленочных генераторов на биполярных транзисторах, разработанная фирмой Avantek в 1976 г. Приборы этой серии размещаются в стандартных корпусах ТО-8 [232].

8.1. ГЕНЕРАТОРЫ НА ЛПД

Более распространенными твердотельными источниками СВЧ колебаний в миллиметровом диапазоне являются генераторы на ЛПД. Они привлекают внимание разработчиков РЭА своими малыми размерами и массой, низковольтным питанием, высокой надежностью, приемлемой температурной стабильностью частоты и невысокими уровнями амплитудных и частотных шумов. По выходной мощности и КПД они практически не имеют конкурентов среди других твердотельных приборов миллиметрового диапазона [226].

Генераторы на ЛПД все больше вытесняют электровакуумные СВЧ приборы малой и средней мощности из многих видов РЭА. Эти генераторы начали применяться в радиорелейных линиях связи, системах доплеровской посадки самолетов и высотомерах, портативных и переносных РЛС, фазированных антенных решетках РЛС, системах сигнализации и в другой аппаратуре. Они используются в качестве генераторов в передающих устройствах и гетеродинов в приемниках, генераторов накачки параметрических усилителей и источников колебаний в измерительной аппаратуре. Зарубежными фирмами выпускается более 200 типов генераторов на ЛПД, технический уровень которых характеризуется следующими основными данными.

Частота и мощность. За рубежом освоен промышленный выпуск генераторов на ЛПД в диапазоне частот 4 ... 160 ГГц и ведутся разработки экспериментальных приборов на более высокие частоты [54]. Эти генераторы созданы и разрабатываются для работы как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Генераторы на ЛПД в непрерывном режиме имеют $P_{\text{вых}}=10 \dots \dots 300$ мВт. В диапазоне частот выше 75 ГГц $P_{\text{вых}}=$

$\approx 1 \dots 50$ мВт. Вместе с тем отдельные типы генераторов имеют выходную мощность до $1 \dots 3$ Вт в непрерывном режиме и до 120 Вт в импульсном.

Перестройка частоты. Выпускаемые генераторы на ЛПД по способу перестройки частоты подразделяются на приборы с фиксированной частотой и с перестройкой частоты механическим и электрическим способами.

Механическая перестройка частоты хотя и может обеспечить изменение частоты генераторов в пределах октавы (67%), но является весьма инерционной и не позволяет создавать приборы с большим числом допустимых перестроек частоты. Поэтому она используется чаще всего в сочетании с электрической перестройкой и в основном для подстройки генератора на номинальную частоту, вокруг которой производится быстрая перестройка.

Электрическая перестройка частоты осуществляется изменением тока смещения ЛПД или дополнительного включения в резонатор генератора элементов с переменной емкостью (варакторов) и индуктивностью (монокристаллов железо-иттриевого граната). Промышленные образцы генераторов на ЛПД с перестройкой частоты изменением тока смещения имеют более широкий диапазон перестройки, достигающий 25%. На лабораторных образцах показана возможность расширения перестройки до 40%, но для ее реализации требуется создание

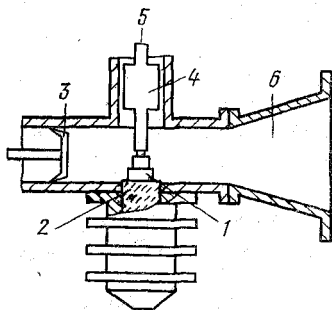


Рис. 8.5. Широкодиапазонный генератор на ЛПД, перестраиваемый током смещения:

1 — ЛПД; 2 — теплоотвод; 3 — подвижный поршень; 4 — фильтр нижних частот; 5 — ввод питания ЛПД; 6 — волноводный переход

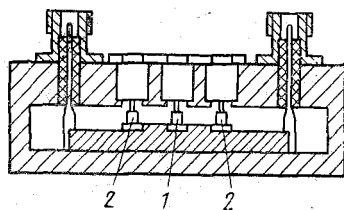


Рис. 8.6. Генератор на ЛПД с варакторной перестройкой частоты в волноводе уменьшенной высоты:

1 — ЛПД; 2 — варакторные диоды

специальных кремниевых диодов асимметричного профиля легирования с двойным дрейфом [227]. Однако эти генераторы в указанном диапазоне перестройки имеют значительный перепад выходной мощности, достигающий 15 дБ и более. Простейшая конструкция генераторов этого типа схематически показана на рис. 8.5.

Генераторы на ЛПД с варакторной перестройкой позволяют получить малоинерционную линейную перестройку частоты в пределах до 20% [229]. В промышленных образцах этих генераторов перестройка составляет пока 5%. В отличие от генераторов с перестройкой током смещения генераторы с варакторной перестройкой имеют значительно меньший перепад мощности по диапазону перестройки. Одним из примеров наиболее широкополосного генератора с варакторной перестройкой является генератор, конструкция которого показана на рис. 8.6.

Для получения широкой полосы перестройки на $f = 7,1 \dots 9,2$ ГГц использован П-образный волновод с двумя переходами на 50-омные коаксиальные линии. Расположение ЛПД и двух варакторных диодов выбраны из условия получения максимальной полосы перестройки. Максимальная перестройка такого генератора составляет 27% [228]. Мощность в диапазоне перестройки меняется в небольших пределах 22 ... 28 мВт. Для осуществления перестройки частоты в указанном диапазоне необходимо изменять напряжение на варакторах от 0 до 50 В.

Перестройка частоты генераторов на ЛПД с помощью железо-иттриевого граната (ЖИГ) достигает 30% при изменении выходной мощности до 15 дБ [221]. В более узкой полосе перестройки можно сохранить одинаковую выходную мощность. Перестройка частоты с помощью ЖИГ более инерционна, требует применения электромагнита с мощным источником питания и имеет плохую повторяемость настроечной характеристики из-за гистерезиса. Этот метод перестройки генераторов используется только в тех случаях, когда требуется обеспечить линейную перестройку в широком диапазоне частот.

КПД. Генераторы на IMPATT-диодах среди других полупроводниковых генераторов на частотах более 5 ГГц обладают более высоким КПД. При $P_{\text{вых}} = 25 \dots 250$ мВт их КПД в зависимости от частоты лежит в пределах 2 ... 12,5%. На частотах до 50 ГГц макси-

мальные КПД=12,5%. На $f=90 \dots 100$ ГГц $\eta=2 \dots 5\%$.

Высокие значения КПД получены у импульсных генераторов на ТРАПАТТ-диодах на $f \approx 2,3$ ГГц. При $P_{\text{и}} = 120$ кВт (средняя мощность 1 Вт) $\eta=45\%$.

Стабильность частоты. Генераторы на ЛПД обладают высокой температурной стабильностью частоты и малыми АМ и ЧМ шумами. Их ТКЧ обычно составляет $10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. При использовании методов стабилизации частоты и компенсации тепловых уходов значения ТКЧ удается снизить до $5 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ [215]. АМ шумы генераторов на ЛПД, измеряемые в полосе частот 100 Гц на расстоянии 10 кГц от несущей, на 120 ... 122 дБ ниже уровня колебаний на рабочей частоте (рис. 8.4). ЧМ шумы, измеряемые в этих же условиях, составляют 50 ... 100 Гц. У генераторов со стабилизацией частоты АМ и ЧМ шумы несколько меньше указанных значений.

Теплоустойчивость. Существующие типы генераторов на ЛПД обеспечивают надежную работу в широком интервале температур окружающей среды. Лучшие типы генераторов, например генераторы на кремниевых ЛПД

Таблица 8.1

Основные параметры перестраиваемых генераторов на ЛПД

Способ перестройки	Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	Δf , %	$P_{\text{вых}}$, мВт
Механическая и током смещения	41214Н	Hughes	26,6...40	9	100
Механическая и током смещения	41234Н	"	40...60	8	100
Механическая и током смещения	41253Н	"	60...90	7	50
Механическая и током смещения	41262Н	"	75...110	5	25
Током смещения	41011Н	"	26,6...40	23	2
Током смещения	Нет свед.	"	40...60	40	3...100
Током смещения	Нет свед.	Nippon Electric	51...75	38	0,1...16
Током смещения	41061Н	Hughes	75...100	11,5	1
Варакторная	Нет свед.	TRW Systems	7,2...9,3	27	150...500
Варакторная	Нет свед.	RCA	25...31	21	28±8
Варакторная	Нет свед.	"	27,5...34,5	23	40...150
ЖИГ	Нет свед.	Sperry	7,7...10,3	29	3...75
				10	75

типа 790SSX фирмы Teledyne, успешно используются при температурах от -51 до $+71^{\circ}\text{C}$.

Долговечность. Срок службы генераторов на ЛПД, как и других твердотельных СВЧ приборов, в зарубежной литературе оценивается значением среднего времени наработки на отказ. Это время для приборов данного типа зависит от выходной мощности, конструкции генератора и составляет $10^4 \dots 10^7$ ч.

Параметры отдельных типов генераторов на ЛПД приведены в табл. 8.1. Фирмой Hughes, которая является ведущей по разработке и выпуску генераторов на ЛПД, создана серия этих приборов на унифицированные поддиапазоны частот $26,6 \dots 110$ ГГц и ведется разработка на поддиапазон $130 \dots 170$ ГГц [85]. Указанные приборы созданы на основе кремниевых ЛПД и предназначены для работы в непрерывном режиме. Они имеют волноводную конструкцию с вентилями и подразделяются на генераторы с фиксированной частотой, механической и электрической перестройками и свипируемые. Диапазон механической перестройки частоты достигает 5 ГГц, а электрической — около 100 МГц.

Интервал выходных мощностей выпускаемой серии генераторов составляет $10 \dots 200$ мВт. В диапазоне частот $75 \dots 110$ ГГц выходная мощность не более 50 мВт, а в диапазоне $130 \dots 170$ ГГц 16 мВт. Типичные значения частотной и амплитудной стабильностей составляют соответственно $0,005\%/^{\circ}\text{C}$ и $0,01$ дБ/ $^{\circ}\text{C}$ в интервалах рабочих температур $+15 \dots +35^{\circ}\text{C}$ и $+25 \dots +50^{\circ}\text{C}$. Питающее напряжение этих генераторов не превышает 50 В при максимальном рабочем токе до 0,5 А.

Фирма Plessey разработала для полностью твердотельного параметрического усилителя на $f=7,5$ ГГц генераторы на IMPATT-диодах с $P_{\text{вых}}=300$ мВт на $f=51$ ГГц [222]. На этой частоте $P_{\text{вых max}}=820$ мВт при $\eta=12,5\%$. Этой же фирмой разработаны более высокочастотные генераторы на 65 ГГц с $P_{\text{вых}}=200$ мВт и $\eta=7,5\%$ и на 90 ГГц с $P_{\text{вых}}=100$ мВт и $\eta=5\%$. Эти генераторы поставляются изготовителями параметрических усилителей для самолетных РЛС и наземных станций космической связи.

В Японии на основе арсенидо-галлиевого ЛПД с упрощенной упаковкой (корпусом) разработан стабильный гетеродин СВЧ диапазона для использования в телевизионных приемниках спутниковых систем прямо-

го телевидения [227]. Выходная мощность этого гетеродина на частоте 12 ГГц составляет 10 мВт при $U_d=50$ В и $I_d=17$ мА. В прежних системах использовались гетеродины, состоящие из кварцевого генератора с умножителем частоты. Новый генератор проще и дешевле, так как в нем меньше компонентов (1 диод и 1 объемный резонатор).

Фирмой Bell Laboratories разработан гибридный генератор на ЛПД в интегральном исполнении [223]. На частотах 30 ... 60 ГГц в этом генераторе $P_{\text{вых}}=250$ мВт при $\eta=5\%$ и на $f=100$ ГГц — 25 мВт при $\eta=2\%$. В генераторах использованы кремниевые двухпролетные ЛПД на металлизированной кремниевой подложке, микрополосковый резонатор и микрополосковая сочлененная с волноводом линия для вывода СВЧ энергии. Настройка генератора осуществляется в результате взаимодействия настроечного винта, имеющего диэлектрическую вставку, с краевым полем микрополоскового резонатора. Фирма Thomson — CSF выпускает генераторы на ЛПД непрерывного режима на $f=32 \dots 40$ ГГц с $P_{\text{вых}}=200$ мВт и $\eta=4\%$ [230]. Диапазон механической настройки частоты этих генераторов составляет ± 250 МГц. Они работоспособны в интервале температур $-20 \dots +50^\circ\text{C}$.

Отдельными фирмами разработаны генераторы на ЛПД для работы в импульсных режимах. Например, фирмой Mullard созданы генераторы на TRAPATT-диодах для передатчиков самолетных высотометров и бортовых систем посадки самолетов. Выходная мощность этих генераторов в импульсе составляет 120 Вт на $f=2.3$ ГГц при $\eta=45\%$. Средняя мощность превышает 1 Вт при $K_s=4\%$ [231]. В указанных генераторах используется диод с $p^+ - n - n^+$ -структурой, полученной методом глубокой диффузии, отличительной особенностью которого является высокая воспроизводимость и стабильность характеристик. Специалисты фирмы Mullard считают, что такие генераторы будут широко использоваться для замены ЛБВ и СВЧ триодов во многих импульсных радиолокационных системах.

К твердотельным СВЧ генераторам в некоторых случаях предъявляются очень высокие требования по стабильности частоты и уровню ЧМ шума. Это вынуждает разработчиков твердотельных СВЧ приборов прибегать к использованию известных в СВЧ электронике методов стабилизации частоты с помощью внешних высокочдо-

Таблица 8.2

Параметры стабилизированных генераторов на ЛПД [212, 217]

Способ стабилизации	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}'$ МВт	ТКЧ, 1/°С
Резонатор проходного типа	Matsushita	9,8	50	10^{-5}
Резонатор отражательного типа	Nippon Electric	10,7...11,7	550	$5 \cdot 10^{-7}$
Два резонатора реактивного типа	Fujitsu	18...26,6	700	$6 \cdot 10^{-7}$
Резонатор из инвара	"	42,1	100	$2 \cdot 10^{-6}$
Резонатор из инвара	"	81	31,6	$2 \cdot 10^{-6}$
Резонатор реактивного типа	Nippon Electric	80	55	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Резонатор проходного типа	То же	80		$2 \cdot 10^{-6}$

бротных резонаторов или синхронизации частоты от внешнего источника.

Наиболее распространенным методом является применение стабилизирующих резонаторов, которые в зависимости от схемы включения подразделяются на резонаторы проходного, реактивного и отражательного типа [53]. Этот метод позволил ряду зарубежных фирм создать образцы высокостабильных генераторов на ЛПД с очень малыми значениями ТКЧ и ЧМ шумов (табл. 8.2). ТКЧ стабилизированных генераторов на ЛПД более чем на три порядка меньше ТКЧ обычных нестабилизированных генераторов. Эти генераторы по стабильности частоты практически не уступают отражательным клистродам и ЛОВ О-типа.

Стабилизирующий резонатор обеспечивает также значительное уменьшение ЧМ шума. Так, например, у генератора на $f=10,7 \dots 11,7$ ГГц, разработанного фирмой Nippon Electric, ЧМ шум в полосе 1 кГц на расстоянии 500 кГц от несущей не превышал 15 Гц [212]. У генератора на $f=9,8$ ГГц фирмы Matsushita ЧМ шум в полосе 1 Гц на расстоянии 1,4 кГц от несущей составлял 2 Гц [229]. По уровню ЧМ шума стабилизированные генераторы на ЛПД также не уступают отражательным клистродам и заметно превосходят ЛОВ О-типа.

Применение стабилизирующих резонаторов несколько усложняет конструкцию твердотельных СВЧ генера-

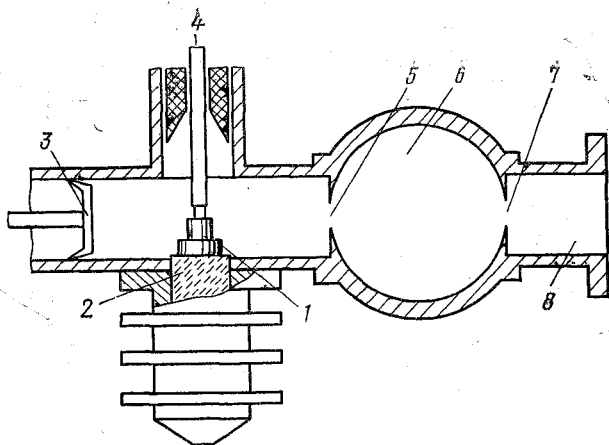


Рис. 8.7. Стабилизированный генератор на ЛПД с резонатором проходного типа:

1 — ЛПД; 2 — теплоотвод; 3 — настроечный поршень; 4 — ввод питания; 5, 7 — окна связи; 6 — высокочастотный резонатор; 8 — выходной волновод

торов, так как требуется включение дополнительных резонаторов, элементов их настройки, диафрагм и других элементов связи и т. д. В результате увеличиваются габаритные размеры и масса этих приборов. Некоторое представление о конструкции генераторов на ЛПД со стабилизирующими резонаторами дают примеры, показанные на рис. 8.7—8.9.

Генератор со стабилизирующим резонатором проходного типа (рис. 8.7) кроме диода содержит отрезок пря-

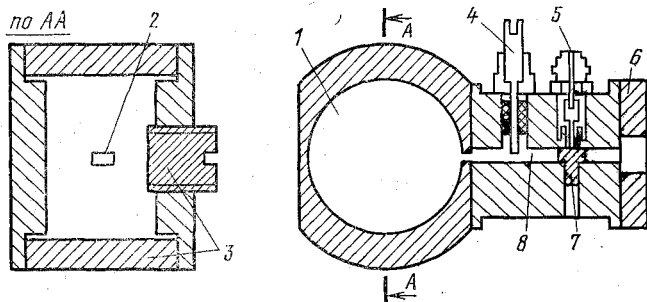


Рис. 8.8. Стабилизированный генератор на ЛПД с резонатором отражательного типа:

1 — стабилизирующий резонатор; 2 — окно связи; 3 — инваровые стенки и винт настройки; 4 — винт настройки; 5 — ввод питания; 6 — трансформатор; 7 — ЛПД; 8 — активный резонатор

моугольного волновода с настраиваемым поршнем, устройством крепления диода и отвода тепла, элементов ввода напряжения смещения, внешнего высокочастотного резонатора с элементами связи и волноводного вывода энергии. Генератор с инвариантным резонатором отражательного типа (рис. 8.8) фирмы Nippon Electric на $f=10,7 \dots 11,7$ ГГц имеет элементы настройки и крепления диода, а также устройство ввода напряжения смещения. Генератор соединяется со стандартным волноводом через четвертьволновый трансформатор. Параметры указанного генератора приведены в табл. 8.2.

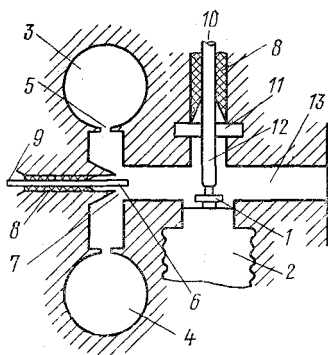


Рис. 8.9. Генератор на ЛПД, стабилизированный резонаторами с гибридной связью:

1 — ЛПД; 2 — теплоотвод; 3, 4 — стабилизирующие резонаторы; 5 — окно связи; 6 — Т-мост; 7 — диафрагма; 8 — поглотитель; 9, 12 — внутренний проводник коаксиальной линии; 10 — ввод питания; 11 — коаксиальный фильтр; 13 — выходной волновод

В источнике СВЧ колебаний, разработанном фирмой Fujitsu, используется генератор на ЛПД с двумя высокочастотными резонаторами, которые подключены к основному волноводу через Т-мост (рис. 8.9). Этот генератор обеспечивает работу на одном типе колебаний и допускает перестройку частоты в диапазоне $18 \dots 26,6$ ГГц. ТКЧ этого генератора не превышает $6 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$, а ЧМ шум в полосе 1 кГц на расстоянии 100 кГц от несущей составляет 92 Гц [215].

Наряду с указанными конструкциями стабилизированных генераторов на ЛПД имеются отдельные типы генераторов в интегральном исполнении. Один из таких генераторов описан в работе [229]. Этот генератор кроме основного резонатора ЛПД содержит стабилизирующий резонатор отражательного типа и низкочастотный резонатор с варакторным диодом. На частоте 9,8 ГГц его $P_{\text{вых}} \approx 50$ мВт, механическая перестройка 450 МГц и варакторная перестройка 50 МГц.

8.2. ГЕНЕРАТОРЫ НА ДИОДАХ ГАННА

Генераторы на диодах Ганна, так же как и генераторы на ЛПД, очень распространенные твердотельные

источники СВЧ колебаний. Они тоже имеют малые размеры и массу, низковольтное питание, низкий уровень амплитудных и частотных шумов, большой срок службы и высокую надежность. Генераторы этого типа успешно применяются вместо отражательных клистронов и ЛОВО в аппаратуре связи, доплеровских и импульсных портативных и переносных РЛС, активных фазированных антенных решетках РЛС, приемоответчиках, системах охранной сигнализации и во многих других видах аппаратуры. Они используются в качестве генераторов передающих устройств непрерывного и импульсного режимов, свип-генераторов в панорамных измерительных приборах, гетеродинов в приемных устройствах и генераторов накачки параметрических усилителей [38].

В настоящее время более 250 типов генераторов на диодах Ганна выпускаются зарубежными фирмами. Технический уровень этих генераторов характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Генераторы на диодах Ганна созданы на $f=0,3 \dots 300$ ГГц [233]. Большинство этих приборов разработано и серийно выпускается на $f=8 \dots 65$ ГГц. На $f < 8$ ГГц генераторы на диодах Ганна успешно конкурируют с транзисторными генераторами, работающими на основной частоте (без применения

Таблица 8.3

Основные параметры генераторов на диодах Ганна [218, 219]

Тип прибора	Завод-изготовитель	f , ГГц	Способ перестройки	Δf , %	$P_{\text{вых}}$ мВт
WJ5008-47	Watkins — Johnson	8...12,4	ЖИГ	43	20
VSX9070	Varian	8...12,4	"	43	10
WJ5157	Watkins — Johnson	8...18	"	77	5
WJ5041-47	То же	12,4...18	"	37	20
A30389	Omni Spectra Ing.	12,4...18	Варакторный	37	5
SSVO/27	Solid State Techn.	12...18	—	40	10
WJ5600-1	Watkins — Johnson	18...26,5	ЖИГ	38	10
WJ5610	То же	26,5...40	"	40	5
VSA9010	Varian	26,5...40	Механический	3	10
E9020	"	50...60	"	0,4	5

умножителей). На более высоких частотах эти генераторы вместе с генераторами на ЛПД сохраняют свое преимущество перед всеми другими твердотельными источниками СВЧ колебаний. На $f > 65$ ГГц во многих конструкциях генераторов на диодах Ганна для повышения частоты используются удвоители и утроители частоты. Подобные генераторы созданы, в частности, отделением фирмы Alpha. Параметры некоторых генераторов приведены в табл. 8.3. Наиболее высокочастотными генераторами на диодах Ганна, работающими на основной частоте (без умножения), являются генераторы, используемые в качестве гетеродина в созданных фирмой Hughes приемных устройствах на $f = 94$ ГГц [232].

Минимальная выходная мощность генераторов на диодах Ганна в непрерывном режиме составляет 5 ... 200 мВт. Среди них имеется большое число генераторов с $P_{\text{вых}} \sim 100$ мВт на $f = 40, 50, 60$ ГГц, которые широко применяются для накачки параметрических усилителей в приемниках спутниковой связи.

Максимальные значения выходной мощности в непрерывном режиме достигают 0,5 Вт при использовании одного диода Ганна и 3 ... 4 Вт при параллельном включении нескольких диодов. Например, фирмой Litton разработан связной передатчик на $f = 10,7 \dots 13,25$ ГГц, генератор которого собран на 8 диодах Ганна, смонтированных в волноводном резонаторе. Суммарная выходная мощность этого генератора составляет 2 Вт. Особенности этого передатчика является наличие механической и электрической перестройки частоты. Электрическая перестройка осуществляется с помощью двух высокочастотных кремниевых варакторов. При рассеиваемой мощности 90 Вт и естественном охлаждении температура корпуса генератора поддерживается на уровне $+60^\circ\text{C}$ [220].

Большая выходная мощность в импульсном режиме получена на генераторах с использованием диодов Ганна на GaAs, работающих в режиме ОНОЗ. На $f = 1,75$ ГГц $P_{\text{и}} = 6$ кВт ($\eta = 15\%$), на $f = 7$ ГГц — 2 кВт ($\eta = 5\%$) и на $f = 12 \dots 18$ ГГц — 0,2 кВт ($\eta = 10\%$). У генераторов на диодах Ганна из фосфида индия максимальная $P_{\text{и}} = 3$ Вт на $f \approx 5$ ГГц и 0,5 Вт на $f = 15$ ГГц.

Перестройка частоты. В генераторах на диодах Ганна используется несколько способов перестройки частоты, в том числе изменением геометрических размеров

резонатора (механическая перестройка), напряжения смещения на диоде, а также применением варакторов и ЖИГ-сфер. Более широкое применение получили генераторы с варакторной и ЖИГ-перестройкой частоты. Генераторы с варакторной перестройкой частоты обладают малыми габаритами и массой и обеспечивают быструю перестройку частоты в диапазоне 35...40%. Скорость перестройки 1 ГГц/мкс. Диапазон перестройки частоты генераторов с ЖИГ-сферой ограничивается только возможностями работы диода с приемлемой эффективностью и в большинстве приборов достигает октавы (67%). Положительное свойство этих генераторов — высокая линейность перестройки частоты. Скорость перестройки значительно меньше, чем у генераторов с варакторной перестройкой, и составляет 1 ГГц/мс.

Генераторы на диодах Ганна из фосфида индия характеризуются гораздо более широким диапазоном перестройки, который в интервале частот 8...28 ГГц превышает октаву. Изменение мощности в диапазоне перестройки частоты у генераторов с варакторной и ЖИГ-перестройкой составляет не более 3 дБ.

ТКЧ. Большие изменения частоты генераторов на диодах Ганна с изменением температуры окружающей среды является некоторым ограничением применения этих генераторов в сложных системах. Однако уменьшение температурного ухода частоты может быть достигнуто применением стабилизирующих схем. ТКЧ у генераторов на $f=8 \dots 12$ ГГц обычно составляет $-2 \dots -0,5$ МГц/°С и связан в основном с температурными зависимостями характеристик полупроводника и контактных соединений. У генераторов с ЖИГ-перестройкой частоты ТКЧ составляет $+1,1 \dots -1,5$ МГц/°С. При соответствующем подборе параметров ЖИГ-сферы можно снизить дрейф частоты почти до нуля [216].

Известны примеры генераторов на диодах Ганна, имеющих температурную стабильность частоты выше стабильности самого диода. Например, фирмой Plessey создан генератор с механической перестройкой частоты в пределах 3 ГГц и с варакторной перестройкой в пределах 1,95 ГГц, имеющий в диапазоне температур $-20 \dots +70^\circ\text{C}$ ТКЧ ~ 150 кГц/°С, в то время как сам диод имеет ТКЧ 1 МГц/°С. В генераторах на $f=8 \dots 12$ ГГц, диоды которых работают в режиме ОНОЗ, ТКЧ достигает 4 МГц/°С, но при соответствующем выборе схемы

обратной связи общий дрейф частоты в диапазоне температур 100°C может быть сведен к 5 МГц [214].

АМ и ЧМ шумы. Генераторы на диодах Ганна имеют очень малые амплитудные и частотные шумы и являются весьма перспективными приборами для создания гетеродинов и генераторов накачки [60]. По уровню АМ и ЧМ шумов они не уступают многим отражательным клистронам (см. рис. 8.3). У некоторых серийно выпускаемых генераторов АМ шум при работе с двумя боковыми полосами ниже уровня несущей на 140 дБ в полосе 100 Гц и при сдвиге от несущей на 5 кГц.

ЧМ шумы значительно зависят от добротности используемых резонаторов. Например, для генераторов на $f \approx 10$ ГГц, разработанных фирмой General Electric, при добротности резонатора 100 и сдвиге от несущей на 10 кГц в полосе 70 Гц ЧМ шум составляет -40 дБ. При добротности 1000 этот шум становится на 30 дБ меньше и равен -70 дБ, что сравнимо с шумами отражательных клистронов, работающих в этом же диапазоне. Фирмой Plessey разработаны генераторы на $f = 12 \dots 18$ ГГц, ЧМ шум которых характеризуется девиацией частоты 6 Гц в полосе 70 Гц и при сдвиге от несущей на 10 кГц, что также сравнимо с шумами клистронов.

Конструкция. Генераторы на диодах Ганна по своему конструктивному выполнению подразделяются на коаксиально-волноводные и полосковые. Примером генераторов коаксиально-волноводной конструкции являются генераторы фирмы Watkins—Johnson. Эти генераторы имеют коаксиальный вывод СВЧ энергии и перестройку частоты в диапазоне 8 ... 12,4 ГГц с помощью ЖИГ-

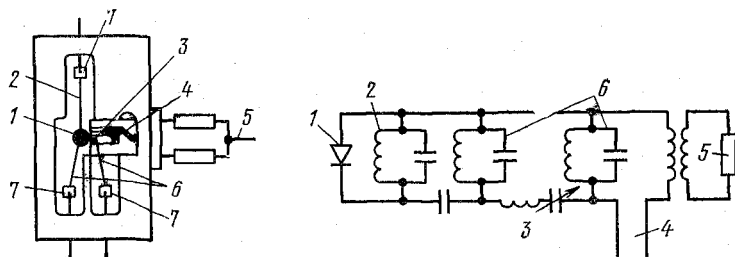


Рис. 8.10. Устройство и эквивалентная схема генератора на диоде Ганна с варакторной перестройкой частоты:

1 — диод Ганна; 2 — цепь смещения диода Ганна; 3 — варактор; 4 — резонатор; 5 — вывод СВЧ энергии; 6 — цепь смещения варакторного диода; 7 — разделительный конденсатор

сферы. Параметры указанных генераторов приведены в табл. 8.3.

Примером другой конструкции является генератор (рис. 8.10), который содержит корпусный диод Ганна и бескорпусный варакторный диод на GaAs, цепи смещения, микрополосковый резонатор в виде разомкнутой линии, связанной с 50-омной выходной линией. Все элементы генератора размещены на подложке из окиси алюминия. Напряжения смещения на диод Ганна и варакторный диод подаются через тонкие четвертьволновые проводники, соединенные с разделительными конденсаторами. Цепи смещения представляют собой полосовые фильтры, устраняющие нежелательные колебания и улучшающие электрическую перестройку частоты генератора.

Генератор при постоянном напряжении на диоде Ганна (+5 В) перестраивается по частоте в диапазоне 11,6 ... 18 ГГц изменением напряжения на варакторе в пределах +1,2 ... -40 В и обеспечивает $P_{\text{вых}}=4 \dots 30$ мВт. При небольшом изменении напряжения на диоде Ганна 5 ... 7 В диапазон электрической перестройки частоты при тех же условиях несколько расширяется и составляет 10 ... 18 ГГц, а выходная мощность сохраняется в пределах 9 ... 30 мВт.

Долговечность. Промышленные типы генераторов на диодах Ганна по механической прочности и климатической устойчивости отвечают жестким эксплуатационным требованиям наземной и бортовой аппаратуры. Прогнозируемый срок службы этих генераторов 100 тыс. ч.

8.3. ГЕНЕРАТОРЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Создание биполярных и полевых СВЧ транзисторов обеспечило возможность разработки и промышленного выпуска широкой номенклатуры твердотельных СВЧ генераторов на их основе с выходными мощностями, не уступающими отражательным клистродам и ЛОВО. Массовый выпуск этих генераторов осуществляется с 1970 г. Генераторы на транзисторах, так же как и другие твердотельные СВЧ генераторы, имеют малые размеры и массу, низковольтное питание, низкий уровень амплитудных и частотных шумов, большой срок службы и высокую надежность [38]. Они подразделяются на генераторы с фиксированной частотой и перестраиваемые

по частоте. Электрическая перестройка частоты осуществляется с помощью варакторов и ЖИГ-сфер.

Генераторы на транзисторах, как правило, создаются на основе использования трехточечной схемы с емкостной связью. Для обеспечения положительной обратной связи используются как внутренняя связь в самом транзисторе, так и элементы внешней цепи. В схемах генераторов с применением мощных транзисторов используется внутренняя обратная связь. Для обеспечения стабильной работы генераторов на транзисторах кроме стабилизированных резонаторов используются также транзисторы с более высокой выходной мощностью, чем это требуется от генератора. При этом излишек мощности рассеивается в развязке, подключаемой к выходу генератора.

В генераторах применяются как биполярные, так и полевые транзисторы. Применение полевых транзисторов обеспечивает создание генераторов на более высоких частотах, не прибегая к схемам умножения частоты или к работе транзисторов на гармониках [65]. Генераторы на транзисторах успешно применяются вместо отражательных кलिстронов и ЛОВО в аппаратуре связи, радиолокации, радионавигации и во многих других областях техники. В настоящее время известно более 300 типов генераторов на транзисторах, технический уровень которых характеризуется следующими данными.

Таблица 8.4

Основные параметры генераторов на биполярных транзисторах с варакторной перестройкой

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	Δf_s , ГГц	$P_{\text{вых}}$, мВт
WJ2832	Watkins—Johnson	0,5...2,0	Октава	20
SM—VCO875P	Spectrum Micro-wave	0,75...1,0	0,25	600
WJ5060	Watkins — Johnson	1,0...12,5	11,4	2
VTS621	Teledyne — Micro-wave	2,0...4,0	Октава	50
WJ2832-36	Watkins — Johnson	2,0...4,0	"	85
287745-67B	Omni — Spectra	2,6...5,4	"	50
VTO—8240	Avantek	2,4...3,6	0,1	20
VTD—4900	"	4,9...6,1	1,2	20
WJ 2844-50	Watkins Johnson	4,0...8,0	Октава	50
WJ2818	То же	5,6...8,0	2,4	20
WJ2833—36	"	8,0...12,0	4	15

Основные параметры генераторов на транзисторах с ЖИГ-перестройкой

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	Δf , ГГц	$P_{\text{вых}}$, мВт	$\Gamma_{\text{Г}}$, дБ
WJ5060	Watkins — Johnson	1...12,4	11,4	2...4	
302 16	Electr. Surv. Corp.	1...2	1	30	20...30
303 12	То же	2...4	2	20	20...30
YOM 40	Omniyig	1...4	3	50...85	60
YOL52 ¹⁾	"	2...8	6	30	60
YOL52 ²⁾	"	2...12	8	10	60
YOL52 ³⁾	"	2...18	16	5	60
—	Hewlett — Packard	6...12,4	6,4	3	20
AV71201	Avantek	12...18	5	5	15...20

1) С умножителем YM1012; 2) YM1001; 3) YM1818.

Частота и мощность. Генераторы на СВЧ транзисторах созданы на $f=0,3 \dots 20$ ГГц. Основные параметры этих генераторов приведены в табл. 8.4 и 8.5.

В диапазоне частот до 6 ГГц эти генераторы обеспечивают выходную мощность до 100 мВт. Получение колебаний на частотах более 6 ГГц в большинстве существующих конструкций генераторов обеспечивается в результате использования транзистора в режиме удвоения частоты либо сочетания генератора и умножителя частоты в одном приборе. В отдельных конструкциях генераторов в целях повышения выходной мощности применяются дополнительные каскады, обеспечивающие усиление колебаний задающего генератора. Выходная мощность генераторов с умножением частоты значительно уменьшается и составляет на частотах до 12 ГГц около 10 ... 20 мВт, а на частотах до 20 ГГц — 3 ... 5 мВт.

Примерами самых высокочастотных однокаскадных генераторов, собранных на одном транзисторе, являются генераторы фирм Hewlett—Packard и Avantek. Фирма Hewlett—Packard еще в 1974 г. показала возможность создания генератора на биполярных транзисторах, работающего на $f=6 \dots 12,4$ ГГц в режиме основных колебаний. Октавная перестройка частоты этих генераторов осуществляется с помощью ЖИГ-резонатора. Его $P_{\text{вых}}=3$ мВт, подавление гармоник более 20 дБ и паразит-

ных колебаний более 50 дБ [225]. Фирма Avantek в 1977 г. сообщила о разработке на полевом транзисторе генератора AV71201 на $f=12 \dots 18$ ГГц с ЖИГ-перестройкой. Этот генератор имеет $P_{\text{вых min}}=5$ мВт с неравномерностью мощности ± 3 дБ и подавлением второй гармоники более 15 дБ, третьей гармоники более 20 дБ и прочих паразитных колебаний более 60 дБ. Нелинейность частотной характеристики $\pm 0,1\%$, температурный дрейф частоты 5 МГц в диапазоне температур $0 \dots +60^\circ\text{C}$ [233].

В качестве примера сложных приборов, содержащих генератор и умножитель частоты, можно привести генератор-умножитель с двойной ЖИГ-перестройкой, разработанный фирмой Omnipig [226]. Он состоит из генератора с усилителем на биполярных транзисторах с ЖИГ-перестройкой на $f=1 \dots 2$ ГГц и подключаемых к нему умножителей частоты с ЖИГ-фильтром. При использовании в этом генераторе умножителя типа YM1818 прибор может перестраиваться на $f=2 \dots 18$ ГГц при $P_{\text{вых min}}=5$ мВт. Два других умножителя типов YM1012 и YM1001 обеспечивают перестройку генератора на $f=2 \dots 8$ и $2 \dots 12$ ГГц с $P_{\text{вых min}}=30$ и 10 мВт соответственно.

С созданием и применением более мощных биполярных и полевых транзисторов выходная мощность указанных генераторов будет повышаться. Вместе с тем в диапазоне частот выше $4 \dots 6$ ГГц генераторы на биполярных транзисторах в ближайшее время будут уступать генераторам на полевых транзисторах и диодах Ганна. Применение этих транзисторов и диодов позволит значительно упростить схемы генераторов (исключить применение в них усилителей мощности и умножителей частоты) и соответственно повысить их надежность в эксплуатации.

Перестройка частоты. Генераторы на СВЧ транзисторах имеют два основных способа перестройки частоты и по величине перестройки подразделяются на узко- и широкодиапазонные.

Применение варакторов обеспечивает плавную электрическую перестройку частоты генераторов в пределах от 10% до нескольких октав. Наиболее распространены являются генераторы с октавной перестройкой частоты (см. табл. 8.4). Наряду с этими отдельными фирмами выпускаются генераторы с очень широким рабочим

диапазоном частот. Например, фирма Watkins—Johnson с 1970 г. выпускает генераторы WJ5060, которые имеют плавную перестройку частоты в диапазоне 1 ... 12,4 ГГц (т. е. почти четыре октавы) с $P_{\text{вых min}}=1 \dots 2$ мВт [213].

Изменение C_d варакторов обеспечивается изменением напряжения смещения, подводимого к диоду. Значения этого напряжения в зависимости от типа варактора и рабочего диапазона частот находятся в пределах 10 ... 80 В. Зависимость частоты от напряжения варактора чаще всего носит характер экспоненциальной или линейной зависимости. Отклонение от линейного закона составляет 0,2 ... 3% [218, 223]. При эксплуатации линейность частотной характеристики ухудшается из-за старения элементов генератора (за два года примерно в два раза) [51]. Для улучшения линейности частотной характеристики генераторов с варакторной перестройкой в схему генератора вводятся дополнительные настроенные дискриминаторные каскады, что усложняет их конструкцию и увеличивает массу.

Второй способ перестройки частоты генераторов, основанный на применении ЖИГ-резонаторов, лишен указанных недостатков. Он несколько упрощает конструкцию и обеспечивает более высокую линейность частотной характеристики генераторов. Однако при осуществлении перестройки частоты для питания электромагнитов требуется источник повышенной мощности. При этом значительно снижается максимально возможная скорость перестройки частоты. У генераторов с варакторной перестройкой она превышает 40 ГГц/мкс, а у генераторов с ЖИГ-перестройкой — всего 1 ... 2 ГГц/мкс [230].

Рабочий диапазон частот генераторов с ЖИГ-перестройкой составляет одну или несколько октав (см. табл. 8.5). Как уже указывалось, генератор типа YOL52 с умножителем частоты YM1818 обладает перестройкой более трех октав.

АМ и ЧМ шумы. Генераторы на биполярных и полевых транзисторах являются малозащумными приборами, близкими по своим шумовым характеристикам к малошумным ЛОВО. Типовые значения АМ шумов генераторов с варакторной перестройкой частоты составляют —120 дБ на расстоянии от несущей ~100 кГц. ЧМ-шумы в полосе 1 МГц на расстоянии от несущей 30 МГц на 100 дБ меньше уровня основных колебаний. Монохрома-

тичность колебаний генераторов характеризуется величинами подавления гармонических составляющих $P_r > 20$ дБ и паразитных колебаний на 60 дБ [51].

Долговечность. Существующие генераторы на биполярных и полевых транзисторах обеспечивают нормальную работоспособность в интервале температур $-55 \dots +85^\circ\text{C}$. Средний срок службы этих генераторов по расчетным данным превышает 100 тыс. ч. Имеются сведения, что генераторы на биполярных транзисторах с варакторной перестройкой на $f=2 \dots 4$ ГГц при температуре $+85^\circ\text{C}$ работают 40 тыс. ч без наступления отказов [51]. Однако большинство типов указанных генераторов еще не подвергалось таким длительным испытаниям и поэтому данных о значениях фактического срока службы не имеется.

Конструкция. Наиболее малогабаритными и легкими являются генераторы с варакторной перестройкой частоты. Многие современные конструкции генераторов этого типа выполняются на тонкопленочных интегральных схемах в стандартных корпусах. Примером подобных приборов может служить серия генераторов на $f=0,6 \dots 6,6$ ГГц, выпускаемая фирмой Avantek с 1976 г. Эти генераторы размещены в корпусе ТО-8 (диаметр 16,5 мм и высота 8,4 мм). Генераторы с ЖИГ-настройкой имеют несколько большие размеры и массу. Например, подобный генератор на $f=2 \dots 6$ ГГц, выпускаемый фирмой Ompluig, имеет объем 16,2 см³ и массу 0,28 кг [51].

Глава 9

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ УСИЛИТЕЛИ

Среди твердотельных СВЧ приборов наиболее широкую номенклатуру имеют усилители на полупроводниковых СВЧ диодах и транзисторах. По своему функциональному назначению они подразделяются на маломощные усилители и усилители мощности. К числу маломощных относятся усилители на туннельных диодах и диодах Ганна, полупроводниковые параметрические усилители (ППУ) и усилители на биполярных и полевых транзисторах. Эти усилители предназначены для

применения во входных каскадах высокочувствительных приемных устройств СВЧ диапазона и полностью заменяют малошумящие и сверхмалошумящие ЛБВ.

В качестве усилителей мощности используются усилители на ЛПД и диодах Ганна, биполярных и полевых транзисторах, а также комбинированные многокаскадные усилители с применением тех и других полупроводниковых приборов. Усилители мощности используются в приемно-передающих устройствах СВЧ диапазона, работающих в непрерывном и импульсном режимах. Они заменяют усилительные ЛБВ малой и средней мощности и маломощные усилительные клистроны.

Основными достоинствами твердотельных СВЧ усилителей по сравнению с аналогичными по назначению электровакуумными приборами (ЛБВ и клистроны) являются малые габариты и масса, низковольтное питание, высокая устойчивость к воздействиям механических нагрузок, большая долговечность и возможность использования принципов и технологии микроэлектроники для создания функциональных модулей, хорошо сопрягающихся с микросхемами.

Каждый из видов усилителей в зависимости от применяемого активного элемента обладает некоторыми специфическими особенностями, отличающими их друг от друга. Усилители на туннельных диодах имеют самую простую конструкцию с малыми габаритами и массой, низковольтное питание, низкий коэффициент шума. Вместе с тем у них низкая выходная мощность, невысокая стабильность, малый динамический диапазон и недостаточная электрическая прочность.

Достоинство усилителей на диодах Ганна — высокая мощность насыщения при умеренных значениях коэффициента шума. По чувствительности эти усилители приближаются к усилителям на туннельных диодах, превосходя последние по динамическому диапазону и выходной мощности на несколько порядков.

Параметрические усилители (особенно охлаждаемые до криогенных температур) по минимальному коэффициенту шума лучше всех видов малошумящих усилителей. Однако эти усилители имеют более сложную конструкцию и высокую стоимость, что ограничивает область их практического применения [61].

Усилители на транзисторах по своим техническим характеристикам успешно конкурируют с усилителями

на полупроводниковых СВЧ диодах. Они отличаются еще большей простотой конструкции, низковольтным питанием и высокой надежностью работы в тяжелых условиях эксплуатации. Малошумящие транзисторные усилители по минимальным значениям коэффициента шума приближаются к параметрическим усилителям, а транзисторные усилители мощности по выходной мощности не уступают мощным усилителям на ЛПД [63]. Однако по верхнему пределу рабочей частоты эти усилители еще значительно уступают усилителям на полупроводниковых СВЧ диодах, особенно усилителям на ЛПД и диодах Ганна.

Основным достоинством усилителей на ЛПД является возможность достижения высокой выходной мощности в непрерывном и импульсном режимах и высокой предельной рабочей частоты. Эти усилители уступают остальным твердотельным усилителям по коэффициенту шума и поэтому используются только как усилители мощности (рис. 9.1) [57]. Имеющиеся в настоящее время усилители мощности на ЛПД обеспечивают получение в непрерывном режиме $P_{\text{вых}} \approx 100$ Вт на $f=4$ ГГц, более 30 Вт на $f=10$ ГГц и 3 Вт на $f=60$ ГГц (рис. 9.1).

Усилители на биполярных транзисторах также позволяют получить высокую мощность, но на меньших частотах. В частности, на $f \approx 1$ ГГц $P_{\text{вых max}} = 160$ Вт, на $f \approx 4$ ГГц — 10 Вт и на $f \approx 10$ ГГц — 1 Вт. Импульсные усилители мощности на ЛПД, диодах Ганна и биполярных транзисторах позволяют получить в дециметровом диапазоне выходную мощность $\sim 1 \dots 2$ кВт в импульсе. Приведенные данные еще не исчерпывают имеющиеся возможности по дальнейшему повышению выходной мощности усилителей. Применение более мощных полупроводниковых приборов, а также совершенствование схем суммирования мощностей позволит значительно превзойти мощности, указанные на рис. 9.1.

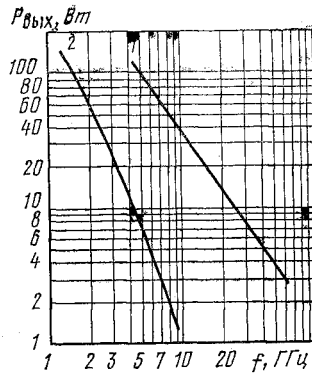


Рис. 9.1. Максимальные значения выходной мощности в непрерывном режиме твердотельных СВЧ усилителей на ЛПД (1) и биполярных и полевых транзисторах (2)

Малозадающие усилители на полупроводниковых приборах позволяют достигнуть очень низких значений коэффициента шума. На рис. 9.2 показаны минимальные значения коэффициента шума параметрических усилителей и усилителей на транзисторах и туннельных диодах. Наименьший коэффициент шума имеют охлаждаемые параметрические усилители. Коэффициент шума усилителей на полевых транзисторах достигает примерно таких же значений, как и у неохлаждаемых параметрических усилителей.

По значениям минимального коэффициента шума твердотельные СВЧ усилители значительно лучше малошумящих и сверхмалозадающих ЛБВ и полностью заменяют их в приемных устройствах систем радиорелейной и космической связи, радиолокации, радиоастрономии и др.

Твердотельные усилители мощности, обладая преимуществами перед электровакуумными усилительными СВЧ приборами малой и средней мощности по габаритам и массе, потреблению энергии, долговечности и надежности, также получили применение в радиорелейных и спутниковых системах связи, доплеровских РЛС и в РЛС с ФАР, системах радионавигации и слепой посадки самолетов.

При конструировании твердотельных СВЧ приборов и устройств в настоящее время используется преимущественно технология изготовления гибридных схем, при которой все пассивные элементы и контактные площадки схемы создаются нанесением на диэлектрическую подложку толстых или тонких пленок, а в качестве активных элементов используются полупроводниковые диоды и транзисторы. При этом полупроводниковые приборы могут применяться в гибридных схемах как в корпусном, так и в бескорпусном исполнении. Переход к указанной технологии изготовления интегральных СВЧ схем позволил повысить их надежность примерно на два порядка [254].

Вместе с тем в последнее время появляются сообщения о создании монолитных интегральных СВЧ схем, в которых все активные, пассивные элементы и их соединения выполняются на общей полупроводниковой подложке в едином технологическом процессе [100]. Монолитные интегральные СВЧ схемы создаются на подложках Si и GaAs в частотном диапазоне выше

15 ГГц, где размеры пластин и затраты материала не очень велики [18].

Разработкой и выпуском твердотельных усилителей занимаются многие фирмы, в том числе и те, которые создают необходимые СВЧ диоды и транзисторы. Состояние и тенденции развития твердотельных СВЧ усилителей характеризуется данными, приведенными ниже применительно к каждому виду приборов в отдельности.

9.1. УСИЛИТЕЛИ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Усилители на туннельных диодах, так же как и параметрические, являются самыми первыми представителями твердотельных приборов, получившими распространение в СВЧ диапазоне. Эти усилители применяются в приемных устройствах многих ранее разработанных систем тропосферной связи, телеметрии, радиоастрономии и радиолокации. Однако с созданием усилителей на ЛПД, диодах Ганна и особенно на биполярных и полевых СВЧ транзисторах интерес к усилителям на туннельных диодах значительно снизился, резко сократились и публикации по этим приборам.

В диапазоне частот до 20 ГГц эти усилители полностью заменяются усилителями на транзисторах, так как уступают последним по минимальному коэффициенту шума, стабильности усиления, простоте конструкции (не требуют применения циркуляторов). Некоторое преимущество усилителей на туннельных диодах пока сохраняется на частотах более 20 ГГц, где усилители на ЛПД и диодах Ганна еще не могут обеспечить получение низкого коэффициента шума. Поэтому новые разработки этих усилителей ведутся только на частотах более 20 ГГц. Ранее разработанные модели усилителей на частотах менее 20 ГГц в настоящее время продолжают выпускаться для нужд эксплуатации существующей РЭА. Технический уровень усилителей на туннельных диодах характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Эти усилители в связи с малой выходной мощностью и низким уровнем шумов диодов используются только как малозумящие усилители. В настоящее время они выпускаются на $f=0,5 \dots 18$ ГГц. Экспериментальные образцы созданы на диапазон частот до 40 ГГц. Выходная мощность усилителей лежит в пределах от нескольких микроватт до нескольких

Таблица 9.1

**Основные параметры малошумящих усилителей
на туннельных диодах**

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$K_{у'}$, дБ	$K_{ш'}$, дБ	$U_{д'}$, В
T3410	Aerotech	0,80...0,89	18	3,5	—
T4604	"	1,43...1,53	12	3,7	12
T5439	"	2,25...2,30	30	3,8	28
T5540	"	2,0...4,0	10	4,5	25
NC3003	Micro State	2,9...3,1	25	3,3	—
T6631	Aerotech	4,0...8,0	10	6,0	25
T6516	"	5,5...6,0	17	5,0	—
SS2100	RCA	5,4...7,1	13,5	5,0	7,6
SS2106	"	9,2...9,7	15	6,5	10
T8731	Aerotech	12,4...18,0	8	7,6	—
T8704	"	15,9...16,3	15	7,0	12
AWP17000-15	Intern. Microwave	16,0...18,0	15	6,5	—

десятков милливольт. Параметры отдельных промышленных типов малошумящих усилителей приведены в табл. 9.1.

Полоса пропускания. Существующие усилители на туннельных диодах в зависимости от схемных решений подразделяются на усилители с ферритовыми циркуляторами, со связью через гибридное соединение и усилители с бегущей волной. Наиболее предпочтительными для большинства применений являются усилители с ферритовым циркулятором. Полоса пропускания усилителей этого типа ограничивается диапазонными свойствами циркуляторов и, как правило, не превышает 15...20%.

Усилители со связью через гибридное соединение (четырёхполюсник) обеспечивают полосу пропускания, равную октаве (67%). Еще более высокую полосу пропускания имеют усилители с бегущей волной, в которых используется несколько туннельных диодов, расположенных вдоль передающей линии на определенном расстоянии друг от друга. Однако в связи с тем, что широкую полосу пропускания можно получить и при других схемных решениях, усилители с бегущей волной не получили широкого распространения.

Коэффициент усиления. Усилители на туннельных диодах в зависимости от числа каскадов имеют $K_{у'} = 8 \dots 50$ дБ (у одного каскада $K_{у'} = 8 \dots 18$ дБ). Уси-

ление ~ 50 дБ получено, в частности, в четырехкаскадном усилителе типа T7531 фирмы Aertech, работающем на $f = 10 \dots 11$ ГГц с $K_{ш} \leq 5,5$ дБ [56].

Динамический диапазон. Характерной особенностью усилителей на туннельных диодах является их сравнительно небольшой динамический диапазон. Нижний предел динамического диапазона определяется уровнем собственных шумов, а верхний ограничивается явлением насыщения усилителя. Для большинства промышленных типов усилителей их насыщение, оцениваемое по уменьшению усиления на 1 дБ, наступает при мощности входного сигнала $0,01 \dots 1$ мкВт [56].

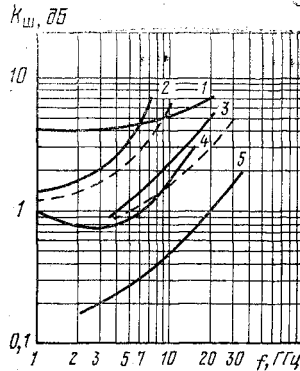


Рис. 9.2. Минимальные значения коэффициента шума твердотельных СВЧ усилителей на:

1 — туннельных диодах; 2 — биполярных транзисторах; 3 — полевых транзисторах; 4 — охлаждаемых ППУ; 5 — неохлаждаемых ППУ

Коэффициент шума. Одним из основных преимуществ усилителей на туннельных диодах по сравнению с усилителями на ЛПД и диодах Ганна является низкий уровень собственных шумов. Коэффициент шума этих усилителей на $f = 0,5 \dots 18$ ГГц составляет $4 \dots 7$ дБ соответственно. Более низкий уровень шумов достигается при использовании туннельных диодов из антимонида галлия. По коэффициенту шума усилители на туннельных диодах уступают только параметрическим усилителям и усилителям на транзисторах (см. рис. 9.2).

Паразитные колебания. Стабильность усилителей на туннельных диодах во многом зависит от правильности выбора туннельного диода и схемы для подведения к нему напряжения смещения. Возникновения паразитных колебаний можно избежать, если схема с используемым диодом обладает положительным входным сопротивлением по отношению к внешней цепочке связи (циркулятору или гибриднему соединению) на всех частотах за пределами желательной полосы пропускания усилителя. Положительные результаты по повышению стабильности усиления обеспечиваются включением

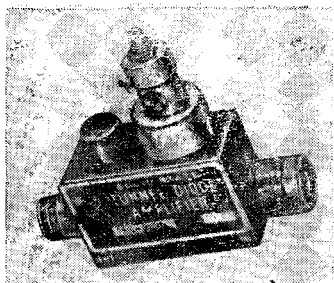


Рис. 9.3. Предварительный усилитель на туннельном диоде SS2100

между источником питания и диодом режекционного фильтра. Однако благоприятные условия для достижения стабильной работы усилителей в полосе пропускания достигаются при использовании четырехплечевого циркулятора.

Напряжение питания.

Усилители работают при $U_d = 8 \dots 30$ В и потребляют от источника питания ток до 10 мА.

Конструкция.

Как уже указывалось выше, существуют несколько типов конструкций усилителей на туннельных диодах, в том числе усилители с ферритовыми циркуляторами, со связью через гибридное соединение и усилители с бегущей волной. Выпускаются и более простые усилители с непосредственной связью. Примером подобного прибора может служить усилитель SS2100 фирмы RCA (рис 9.3). Параметры этого усилителя указаны в табл. 9.1. Усилитель питается от источника с $U_d = 7,6$ В при $I_d = 3,6$ мА. Габаритные размеры усилителя SS2100 $5 \times 8,6 \times 10$ см и $m = 300$ г.

Надежность. Усилители на туннельных диодах обладают высокой механической прочностью и климатической устойчивостью. Благодаря малым размерам диода и всей конструкции усилителя они выдерживают значительные удары и вибрацию в соответствии с требованиями, предъявляемыми к переносной и бортовой аппаратуре. Недостатком этих усилителей является их низкая электрическая прочность. Предельно допустимые значения мощности на входе усилителя составляют для различных типов усилителей всего 10 ... 60 мВт.

9.2. УСИЛИТЕЛИ НА ЛПД

Начиная с 1965 г. стали создаваться промышленные образцы усилителей на ЛПД вначале маломощных, а потом и мощных усилителей непрерывного и импульсного режимов работы.

По принципу построения усилители на ЛПД подразделяются на усилители отражательного типа, в которых для разделения входных и выходных сигналов

используются циркуляторы, и усилители проходного типа, в которых диод включается непосредственно в передающую линию. И те и другие усилители могут быть как однокаскадными, так и многокаскадными с последовательным, параллельным и комбинированным включением диодов [57]. В качестве активных элементов используются кремниевые и арсенидо-галлиевые IMPATT- и TRAPATT-диоды. Усилители на ЛПД выполняются в виде схем с сосредоточенными или распределенными постоянными на основе применения волноводных, коаксиальных и полосковых линий. Технический уровень выпускаемых усилителей на ЛПД характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. К настоящему времени зарубежными фирмами созданы лабораторные и промышленные образцы усилителей на ЛПД в диапазоне частот 0,3 ... 94 ГГц [56]. По мощности усилители условно можно разделить на маломощные и мощные. Выходная мощность маломощных усилителей непрерывного режима составляет 0,5 ... 100 мВт, а мощных — 0,1 ... 100 Вт и более. Минимальные значения мощности относятся к однокаскадным усилителям и усилителям миллиметрового диапазона.

Фирма Hughes выпускает многокаскадные усилители на кремниевых IMPATT-диодах. Рабочая частота этих усилителей $f=8,15 \dots$
 ... 36 ГГц, $\Delta f=0,5 \dots$
 ... 0,9 ГГц и $K_y=7 \dots$
 ... 40 дБ [239]. Этой же фирмой получены интересные результаты при использовании синхронизированного генератора в качестве усилителя. Подобные усилители обеспечивают на $f=7 \dots$
 ... 11 ГГц $P_{\text{вых}} \geq 1$ Вт при $K_y=10$ дБ. Фирмой Hughes созданы также усилители на ЛПД, работающие на $f=50 \dots 75$ ГГц с $P_{\text{вых}}=100$ мВт. Производство коэффициента усиления на полосу

Таблица 9.2

Основные параметры мощных усилителей непрерывного режима на IMPATT-диодах

f , ГГц	Δf , %	$P_{\text{вых}}$, Вт	K_y , дБ	η , %
6,2	9,6	10	31	7
6,2	9,6	5	37	15
7,75	1,3	13	36	5
8,25	6	4,5	4,5	22
9,2	1,3	20	3	—
9	5	5	5	16,4
9,6	2	6	28	4,5
10	1	13	26	5
11,2	2,6	2	10	—
36	1,4	0,2	15	—
60	10	1	22	—
60	3	3	20	—
94	2	0,1	18	5

у этих усилителей составляет 6 ГГц [236]. Фирма Microwave Ass. разработала серию усилителей ML1400 на $f=6 \dots 13$ ГГц с $P_{\text{вых}} \leq 10$ Вт. Усилители этой фирмы выполнены в виде модулей с различными $K_{\gamma}=5 \dots 22$ дБ и $P_{\text{вых}}=1 \dots 10$ Вт.

Параметры отдельных типов усилителей на ЛПД приведены в табл. 9.2. Эти усилители созданы преимущественно на основе применения одно- и двухпролетных IMPATT-диодов. Имеются также усилители непрерывного режима, созданные на TRAPATT-диодах. Например, фирма Hughes в настоящее время выпускает такие усилители на $f=0,3 \dots 10$ ГГц с полосой пропускания 5% и выходной мощностью несколько ватт [237].

Однако наибольшее использование TRAPATT-диоды получили в усилителях импульсного режима работы. Фирмой RCA на диодах этого типа созданы усилители с $P_{\text{и}}=1$ кВт на $f=2$ ГГц и 150 Вт на $f=3$ ГГц [241]. Эта же фирма в 1976 г. сообщила о разработке двух мощных усилителей на TRAPATT-диодах. Один из них на $f=3,1 \dots 3,5$ ГГц с $P_{\text{и}}=200$ Вт при $\tau=100$ мкс и $K_{\text{з}}=15\%$. Другой — на $f=5,0 \dots 5,25$ ГГц с $P_{\text{и}}=150$ Вт при $\tau=1$ мкс и $K_{\text{з}}=0,01\%$ [254]. В настоящее время фирма RCA выпускает для применения в ФАР на $f=3,4$ ГГц с полосой пропускания 12% усилители с $P_{\text{и}}=60 \dots 80$ Вт и $K_{\gamma}=5$ дБ [240].

Примеры импульсных многокаскадных усилителей на TRAPATT-диодах приведены в табл. 9.3. Наибольшая

Таблица 9.3

Основные параметры мощных импульсных усилителей на TRAPATT-диодах

f , ГГц	Δf , %	$P_{\text{и}}$, Вт	τ , мкс	K_{γ} , дБ	η , %
1,0	—	1000	0,5	—	30
1,2	—	1200	0,5—1,0	—	24
2,61	8	214	0,2	8,7	30
3,15	8	254	0,2	—	23
3,3	3	150	50	8,8	—
3,3	12	100	1	7,0	—
3,5	15	300	—	0	25
3,5	10	45	50	7,0	21
3,5	1	70	100	4,8	9,1
8,3	9	34	1	4,9	13
10,3	1,5	100	—	11	7,2

мощность в импульсе получена на многокаскадных усилителях дециметрового диапазона. Мощность 1 кВт достигнута при использовании 4-, а 1,2 кВт — 5-кремниевых ТРАПАТТ-диодов. Есть основания полагать, что с увеличением мощности диодов и увеличением числа каскадов будут достигнуты в дальнейшем более высокие мощности как в импульсном, так и в непрерывном режимах работы.

Коэффициент усиления. Усилители непрерывного режима работы на ИМПАТТ-диодах в зависимости от числа каскадов имеют $K_y = 3 \dots 40$ дБ (коэффициент усиления одного каскада составляет 3 ... 7 дБ). Минимальное значение относится к широкополосным и наиболее высокочастотным усилителям. Усилители импульсного режима работы на ТРАПАТТ-диодах характеризуются относительно небольшим усилением, составляющим всего 5 ... 10 дБ.

Полоса усиления. Многокаскадные усилители на кремниевых ЛПД имеют $\Delta f = 1 \dots 12\%$. Неравномерность коэффициента усиления в этой полосе обычно лежит в пределах от $\pm 0,2$ дБ для узкополосных и до ± 1 дБ для широкополосных усилителей. Например, узкополосный двухкаскадный усилитель на $f = 36$ ГГц с $P_{\text{вых}} = 0,2$ Вт, $K_y = 15$ дБ в рабочей полосе частот 0,5 ГГц (1,4%) имеет неравномерность усиления в пределах $\pm 0,2$ дБ. Широкополосный двухкаскадный усилитель на $f = 9,5$ ГГц с $P_{\text{вых}} = 0,25$ Вт, $K_y = 7$ дБ в рабочей полосе частот 0,9 ГГц (9,5%) имеет неравномерность усиления ± 1 дБ. Как видно из этих примеров, увеличение полосы пропускания усилителей сопровождается некоторым снижением коэффициента усиления, приходящегося на один каскад.

Коэффициент шума. Усилители на ЛПД по коэффициенту шума уступают всем полупроводниковым усилителям СВЧ. По этой причине они редко используются во входных каскадах приемных устройств. Для снижения уровня шумов в первых каскадах этих усилителей применяют малошумящие полевые транзисторы или диоды Ганна. Коэффициент шума усилителей на кремниевых ИМПАТТ-диодах составляет 27 ... 35 дБ. Применение в усилителях арсенидогаллиевых ИМПАТТ-диодов позволяет снизить $K_{\text{ш}}$ до 17 ... 32 дБ, $K_{\text{ш}} = 10$ дБ достигнут при использовании в усилителях кремниевых VARITТ-диодов.

Паразитные колебания. Усилители на кремниевых ЛПД характеризуются низким уровнем паразитных шумов. Так, в упоминавшемся выше двухкаскадном усилителе на $f=36$ ГГц с $P_{\text{вых}}=200$ мВт уровень паразитных шумов ослаблен на 40 дБ. В другом четырехкаскадном усилителе на $f=8,15$ ГГц с $P_{\text{вых}}=100$ мВт уровень паразитных шумов ниже мощности колебаний на рабочей частоте на 80 дБ. Уровень гармоник в усилителях на кремниевых ЛПД ниже мощности на рабочей частоте не менее чем на 15 ... 30 дБ.

КПД. Мощные усилители непрерывного режима на IMPATT-диодах имеют $\eta=5$... 25%. Наименьшие значения относятся в основном к усилителям миллиметрового диапазона. КПД мощных импульсных усилителей на TRAPATT-диодах достигает в дециметровом и сантиметровом диапазонах 25 ... 30%.

Долговечность. К настоящему времени еще не накоплены данные о надежности и долговечности усилителей на ЛПД. Однако отдельные сообщения некоторых фирм свидетельствуют о возможности достижения большой долговечности и высокой надежности усилителей этого типа. Так, например, усилители миллиметрового диапазона на IMPATT-диодах, выпускаемые фирмой Hughes для наземных транспортных средств связи, имеют среднюю наработку на отказ ~ 70 тыс. ч. Эти данные получены фирмой расчетным путем на основе результатов испытаний диодов в усилительных схемах в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации [240].

Фирма NEC в разработанном двухкаскадном усилителе мощности для радиорелейных линий связи на $f \approx 6$ ГГц использует двухпролетные кремниевые IMPATT-диоды 1ST20 с $P_{\text{вых}}=3,5$ Вт. Среднее время наработки на отказ этих диодов составляет $3 \cdot 10^6$ ч при $T=200^\circ\text{C}$ [257].

9.3. УСИЛИТЕЛИ НА ДИОДАХ ГАННА

Несмотря на то, что усилители на диодах Ганна начали создаваться менее 10 лет назад, они заняли прочное место среди электровакуумных и твердотельных усилительных СВЧ приборов. Такие усилители привлекают внимание конструкторов РЭА не только своими малыми размерами и массой, низковольтным питанием и высокой надежностью, но и высокой мощностью насы-

щения, большим динамическим диапазоном, широкополосностью и сравнительно небольшим уровнем шумов.

Усилители на диодах Ганна по чувствительности приближаются к усилителям на туннельных диодах, превосходя их на несколько порядков по выходной мощности. По сравнению с усилителями на полевых транзисторах, предельные рабочие частоты которых ограничены пока 18 ГГц, усилители на диодах Ганна могут быть созданы на частоты до 100 ГГц [51].

Успешное развитие твердотельных СВЧ усилителей, в том числе и на диодах Ганна, способствовало вытеснению из разработок новой РЭА маломощных ЛБВ (с мощностью до 100 мВт) на частотах 8 ... 18 ГГц. Первые сообщения об усилителях на диодах Ганна для замены маломощных ЛБВ в системах связи были сделаны фирмой Watkins—Johnson в 1972 г., затем к разработке этих усилителей подключались и другие крупные фирмы США, Англии, Японии и других стран.

Усилители на диодах Ганна так же, как транзисторные усилители и маломощные ЛБВ, получили применение в приемных устройствах различной аппаратуры радиолокации, навигации, связи, непосредственного приема телевидения со спутников связи и др. Они обеспечивают замену маломощных ЛБВ в тех случаях, когда не требуются очень широкие полосы частот и большие усиления. Сочетание повышенной выходной мощности, широкополосности и малых шумов обеспечивает усилителям на диодах Ганна большое будущее. В настоящее время выпускается уже много типов усилителей на диодах Ганна, технический уровень которых характеризуется следующими данными.

Частота и мощность. Усилители на диодах Ганна созданы на $f=4 \dots 40$ ГГц [55]. Так как рабочий диапазон транзисторных усилителей расширился до 18 ГГц, разработки новых усилителей на диодах Ганна проводятся преимущественно на более высоких частотах, пока недоступных для полевых транзисторов. Фирма Varian, являющаяся лидером в области создания усилителей этого типа, ведет разработку усилителей на диодах Ганна на $f=26 \dots 40$ ГГц и рассчитывает получить в этом диапазоне $K_{ш}=7 \dots 9$ дБ, $K_{у}=10$ дБ на один каскад и мгновенную полосу пропускания около 40% [254]. Сведений о создании более высокочастотных усилителей пока нет, но такие усилители скоро могут появиться,

Выпускаемые усилители в зависимости от назначения подразделяются на входные маломощные усилители и усилители мощности. Выходная мощность маломощных усилителей в основном не превышает 100 мВт. Усилители мощности имеют $P_{\text{вых}}=0,2 \dots 2$ Вт. Отдельными фирмами выпускаются серии усилителей, непрерывно перекрывающие широкий диапазон частот. Например, фирма Varian в 1974 г. разработала серию промышленных типов усилителей на диодах Ганна на $f=5,9 \dots 38$ ГГц [242]. Эти усилители на частотах до 12 ГГц имеют $P_{\text{вых}}=500$ мВт, а на $f=14 \dots 38$ ГГц — 100 мВт с $K_{\text{у}}=35$ дБ и $K_{\text{ш}}=18 \dots 20$ дБ. Каждый усилитель имеет встроенный источник питания.

Задача повышения выходной мощности СВЧ усилителей наряду с применением более мощных диодов Ганна решается также на основе комбинации усилителей Ганна и усилителей на ЛПД в режиме IMPATT. Так, например, фирма Microwave Ass. разработала такой усилитель на $f=10,7 \dots 11,7$ ГГц с $P_{\text{вых}}=1$ Вт и $K_{\text{ш}}=15$ дБ [237]. В этом же направлении ведутся работы фирмой RCA, которая, в частности, разработала 4-каскадный усилитель, состоящий из двух маломощных усилителей на диодах Ганна и двух усилителей на IMPATT-диодах. Этот усилитель на $f=7,6 \dots 8,4$ ГГц имеет $P_{\text{вых}}=0,3$ Вт, $K_{\text{ш}}=14$ дБ и общий КПД $\sim 3\%$.

Таким образом, дальнейшее развитие усилителей на полупроводниковых диодах идет не только по пути повышения рабочих частот, но и в направлении увеличения выходной мощности.

Полоса пропускания. Усилители на диодах Ганна обладают широкой полосой пропускания, которая в зависимости от назначения усилителей составляет $10 \dots 67\%$ и более. В настоящее время продолжают работы в направлении расширения мгновенной полосы частот. В частности, фирма Varian разрабатывает специальные усилители с мгновенными диапазонами частот $8 \dots 12,4$, $12,4 \dots 18$, $18 \dots 26$ и $26 \dots 40$ ГГц. На частотах ниже 26 ГГц достигнуто $K_{\text{у}}=10 \pm 2$ дБ и $K_{\text{ш}}=15 \dots 17$ дБ. На $f=26 \dots 40$ ГГц $K_{\text{ш}}=16 \dots 18$ дБ. Фирма продолжает работу по повышению коэффициента усиления до 20 дБ [248].

Значительный интерес к разработкам усилителей бегущей волны, основанных на эффекте Ганна, связан с получением более широкой полосы пропускания, а так-

же с увеличением коэффициента усиления и выходной мощности. Такие усилители представляют собой отрезок однородного полупроводника с отрицательной дифференциальной проводимостью, длина которого на рабочей частоте превышает длину волны в плазме (рис. 9.4).

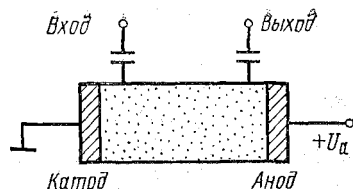


Рис. 9.4. Усилитель бегущей волны на эффекте Ганна

К данному отрезку полупроводника с помощью двух омических контактов прикладывается напряжение смещения, вызывающее появление области с отрицательным дифференциальным сопротивлением. К началу этой области подводится напряжение усиливаемого сигнала. В результате воздействия сигнала в полупроводнике возбуждаются плазменные волны, распространяющиеся в направлении дрейфа электронов и усиливающиеся за счет эффекта Ганна. Усиленный сигнал снимается с выходного электрода, расположенного вблизи конца активной области.

Для уменьшения потерь сигнала в устройствах ввода и вывода СВЧ сигналов в отдельных усилителях применяются контакты с барьером Шоттки [238]. Проведенные исследования показали, что реализация этого принципа обеспечивает достижение намеченных целей. В частности, на образцах GaAs длиной около 100 мкм было получено стабильное усиление в широкой полосе частот 0,5 ... 11 ГГц. На $f=1,1$ ГГц $K_y=25$ дБ, а $P_{и\max}=2$ Вт.

На другом более высокочастотном образце усилителя бегущей волны также наблюдалось стабильное усиление около 13 дБ на частоте 9 ГГц. Коэффициент шума этого усилителя составил 30 дБ, а максимальная мощность — 0,2 мВт при потребляемой мощности источника всего 360 мВт [234]. Японской фирмой NTT разработаны полосковые усилители бегущей волны на GaAs-планарных диодах. В одном из них в 3-м диапазоне достигнут $K_y=30$ дБ. В другом образце на $f=6,6$ ГГц получен $K_y=10$ дБ в полосе от 2 до 7 ГГц [238].

Коэффициент шума. Усилители на GaAs-диодах Ганна на частотах до 26 ГГц имеют $K_{ш}=15 \dots 17$ дБ, а на частотах до 40 ГГц — 16 ... 18 дБ.

Наиболее перспективными для малошумящих усилителей являются диоды Ганна на основе фосфида индия. Они представляют серьезную конкуренцию диодам на GaAs, в частности, по минимальному коэффициенту шума. Диоды Ганна из фосфида индия уже сейчас позволяют получить $K_{ш}=9,2$ дБ на $f=11$ ГГц, 10,7 дБ на $f=14$ ГГц и 7,5 дБ на $f=33$ ГГц. Фирма Varian, используя эти преимущества диодов на фосфиде индия, ведет разработку малошумящих усилителей на $f=26,5 \dots 40$ ГГц. Ожидается, что эти усилители будут иметь $K_{ш}=7 \dots 9$ дБ и $K_y=10$ дБ на один каскад [254]. Основные параметры некоторых типов усилителей на диодах Ганна приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Основные параметры усилителей на диодах Ганна [248]

Фирма-изготовитель	f , ГГц	Δf , %	$P_{\text{вых}}$, мВт	K_y , дБ	$K_{ш}$, дБ
RCA	4...8	67	100	7,5	—
RCA	4,8...6,5	30	1900	20	—
RCA	4,9...11,7	40	400	25	—
RCA	9...15	50	100	6	—
Microwave Ass.	7,6...8,4	10	300	—	14
Microwave Ass.	10,7...11,7	9	1000	—	15
Plessey	12...18	40	7	10	8...9
Varian	10,7...11,2	4,5	200	$18 \pm 0,4$	23,2
Varian	12,4...18	35	—	10 ± 2	15...17
Varian	13,2...18,8	35	250	30	—
Varian	14...14,5	4	200	$18 \pm 0,5$	23,2
Varian	18...26	36	—	10 ± 2	15...17
Varian	26...40	40	—	10	7...9
Varian	36,2...38,6	6,4	100	$12 \pm 0,25$	18...20

Коэффициент усиления. Усилители на диодах Ганна имеют $K_y=6 \dots 30$ дБ. При этом достижение усиления более 10 ... 12 дБ обеспечивается увеличением числа каскадов. Отличительной особенностью усилителей на диодах Ганна является малая неравномерность усиления в заданной полосе пропускания, составляющая у отдельных типов усилителей до $\pm 0,25$ дБ (см. табл. 9.4).

Напряжение питания. Многие промышленные типы усилителей на диодах Ганна выпускаются вместе с встроенными источниками питания. Например, фирма Varian выпускает серию таких усилителей на $f=$

$=5,9 \dots 38$ ГГц с $P_{\text{вых}}=0,1 \dots 0,5$ Вт и K_u до 35 дБ [242]. Напряжения смещения диодов на GaAs обычно в 2 ... 4 раза превышает пороговые напряжения генерации и находятся в пределах 2,5 ... 4,6 В. Для диодов из фосфида индия $U_d=8,8 \dots 9,2$ В.

КПД усилителей на диодах Ганна с повышенной мощностью в непрерывном режиме составляет 1 ... 3%, а в импульсном достигает 3 ... 6%. Прогнозируемая долговечность усилителей по данным фирмы Varian может составлять 100 тыс. ч и более [242].

9.4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

Параметрические усилители, основанные на применении полупроводниковых диодов с переменной емкостью (варакторов), занимают особое место среди маломощных электривакуумных и твердотельных СВЧ усилителей. Основным преимуществом параметрических усилителей является их чрезвычайно низкий уровень шумов, позволяющий создавать в СВЧ диапазоне наиболее высокочувствительные приемные устройства [61]. Вместе с тем эти усилители являются наиболее сложными и дорогостоящими устройствами. Они имеют довольно сложную конструкцию, состоящую из следующих элементов: параметрический диод, генератор накачки, колебательные контура и циркулятор для развязки входной и выходной цепей усилителя. Кроме того, для получения особо низких значений коэффициента шума в этих усилителях используются криостаты или термоэлектрические охлаждающие и термостабилизирующие устройства [16]. Из-за сложности и высокой стоимости ППУ области их практического применения очень ограничены. Они применяются в уникальной радиоастрономической аппаратуре, системах слежения и связи с космическими объектами, аппаратуре спутниковой связи и в радиолокационных станциях дальнего обнаружения [243].

Современный технический уровень ППУ характеризуется следующими данными.

Частота. ППУ созданы и выпускаются для применения на $f=1,2 \dots 46$ ГГц [61]. Наиболее распространенными являются схемы ППУ, содержащие один или два варактора, включенных по балансной схеме. Во многих конструкциях ППУ для достижения необходимого уси-

ления применяются многокаскадные схемы усилителей. В первых каскадах этих усилителей используются сверхмалозумящие ППУ, а в последующих каскадах — наряду с ППУ усилители на туннельных диодах или на полевых транзисторах.

Для накачки ППУ в ранее разработанных конструкциях усилителей применяются отражательные клистроны, а в новых — генераторы на диодах Ганна и на ЛПД. Предпочтение отдавалось генераторам накачки на диодах Ганна, так как они имеют меньшие шумы, чем генераторы на ЛПД. Однако в последнее время отмечается повышенный интерес к применению генераторов на ЛПД, обеспечивающих необходимую мощность.

Частота генераторов накачки обычно составляет 30 ... 100 ГГц. Если генератор не обеспечивает получение требуемой частоты (выше 40 ... 50 ГГц), то применяются умножители частоты на полупроводниковых

Таблица 9.5

Основные характеристики некоторых типов ППУ

Тип и назначение прибора	Фирма-изготовитель	f, ГГц		K _ш , дБ	K _y , дБ	Δf, МГц	t _y , К
		сигнала	накачки				
Охлаждаемый для наземных станций спутниковой связи:	трехкаскадный NTT	3,9	—	0,15	33	500	4,5
	двухкаскадный NEC	3,7...4,2	32 и 61,2	0,8	26	500	233
Однокаскадный для тропосферной линии связи	LNR Communications	4,4...5	—	1,15	13	600	328
Двухкаскадный термостабирированный для наземных станций спутниковой связи	LCT	7,2...7,7	30	1,55	30	500	243±1
Однокаскадный неохлаждаемый для космического корабля	Cutler — Hammer	14,95	70	1,73	17,7	500	268...323
Двухкаскадный охлаждаемый для наземных станций спутниковой связи	NTT	18,5	52,7	1,63	20	600	4,5
Однокаскадный неохлаждаемый для спутникового приемника (m=268 г)	Fujitsu	30,2	75	4,0	10,5	300	—
Однокаскадный охлаждаемый для астрономической обсерватории		46	91,6	0,72	18	430	16

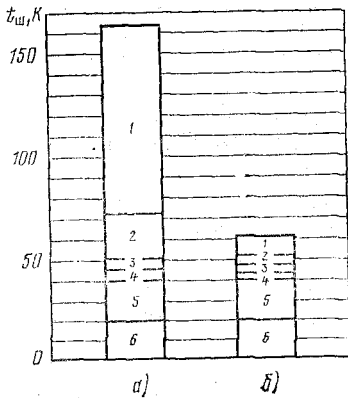


Рис. 9.5. Составляющие шумовой температуры приемного устройства на частоту 7 ГГц с неохлаждаемым (а) и охлажденным до 20 К (б) параметрическими усилителями:
 1 — диода; 2 — циркулятора; 3 — входных цепей; 4 — смесителя; 5 — антенны; 6 — источников питания

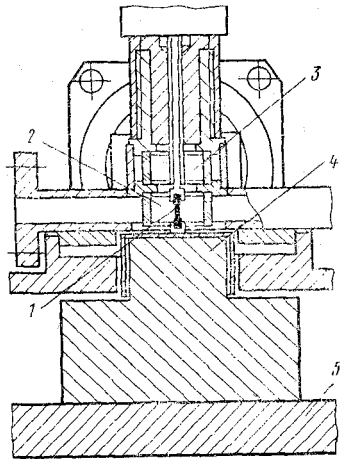


Рис. 9.6. Параметрический усилитель с термоэлектрическим охлаждением:

1 — параметрические диоды; 2 — резонатор на $f=6$ ГГц; 3 — волновод генератора накачки; 4 — термоэлектрический охладитель; 5 — теплоотвод

диодах. Практика применения умножителей частоты показала возможность использования для накачки ППУ менее высокочастотных генераторов, например генераторов на биполярных транзисторах. Примеры характеристик некоторых типов ППУ приведены в табл. 9.5 [61].

Коэффициент шума. Существующие ППУ по минимально достижимому уровню шумов и соответствующему конструктивному выполнению делятся на неохлаждаемые и охлаждаемые. Охлаждаемые ППУ, в свою очередь, подразделяются на два вида: с охлаждением до криогенных температур (4,5 ... 20 К) и с охлаждением до температур 200 ... 240 К с помощью термоэлектрических устройств. Коэффициент шума неохлаждаемых ППУ составляет 0,8 дБ на $f=4$ ГГц и ~2 дБ в диапазоне частот 11 ... 12 ГГц (см. рис. 9.2). Дальнейшее уменьшение коэффициента шума ППУ достигается применением охлаждающих устройств.

Эффективность применения охлаждения для снижения уровня шумов наглядно продемонстрирована на

примере приемного устройства с параметрическим усилителем на $f=7$ ГГц с частотой накачки 43 ГГц [62]. При работе этого усилителя и приемного устройства в целом в условиях комнатной температуры (293 К) их общая эквивалентная $t_{ш}=170$ К. Помещение параметрического усилителя в криостат с $T=20$ К позволило снизить $t_{ш}$ этого приемного устройства до 60 К. Представляет также интерес изменение распределения вклада основных элементов приемного устройства в его общую эквивалентную температуру шума, которое показано на рис. 9.5. Из приведенных диаграмм видно, что основное снижение $t_{ш}$ приемного устройства достигается за счет уменьшения шумов полупроводникового диода и циркулятора. При охлаждении до $T=20$ К шумы диода уменьшаются более чем в 10 раз, а шумы циркулятора — в 4 раза.

Коэффициент шума охлаждаемых ППУ составляет $\sim 0,2$ дБ на $f=4$ ГГц и $\sim 0,5$ дБ в диапазоне частот 11 ... 12 ГГц [245]. Вместе с тем следует заметить, что дальнейшее снижение шумов приемного устройства ограничивается шумами антенны и источников питания. Поэтому для создания сверхмалозумящих приемных устройств необходимо принимать всесторонние меры по снижению шумов всех составляющих элементов этих устройств, в том числе и приемных антенн.

Известно, что шумы антенны зависят не только от ее характеристик, но и от уровня атмосферных и космических шумов, тепловых излучений Земли, воспринимаемых антенной вместе с полезными сигналами. Минимальный уровень шумов антенны достигается при работе в диапазоне $f=2 \dots 20$ ГГц, в котором практически отсутствуют шумы атмосферы и Галактики, а также при направлении главного лепестка диаграммы в зенит. Этим условиям более всего отвечают приемные устройства радиоастрономической аппаратуры и наземных систем космической и спутниковой связи, антенны которых направлены в зенит.

В последнее время наибольшее внимание уделяется созданию ППУ с термоэлектрическим охлаждением и снижению шумов неохлаждаемых усилителей, так как устройство и эксплуатация ППУ с криогенным охлаждением сложные. ППУ с термоэлектрическим охлаждением имеют $K_{ш} \approx 0,7$ дБ при охлаждении первого каскада до -30°C . Применение термоэлектрического охлаж-

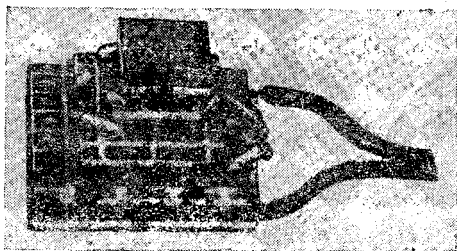


Рис. 9.7. Термоэлектрический охладитель в модульном исполнении, выпускаемый фирмой Nuclar Systems Inc.

дения позволяет создавать схемы термостабилизации, обеспечивающие постоянство температуры с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ [246]. Одна из конструкций ППУ с термоэлектрическим охлаждением на $f=5,84$ ГГц схематически изображена на рис. 9.6. В этом ППУ используется двухкаскадный термоэлектрический охладитель, обеспечивающий охлаждение диода до $T \approx 200$ К (-73°C). При частоте накачки 11,7 ГГц и мощности накачки около 10 мВт усилитель обеспечивает $K_y=16$ дБ и $t_{\text{ш}}=108$ К ($K_{\text{ш}}=1,45$ дБ).

Фирмами Nuclar Systems Inc. (NSI) и Siemens Systems Inc. выпускаются термоэлектрические модули, из которых легко собрать охладители любых размеров с разной холодопроизводительностью на $T=273 \dots 80$ К. Один из таких термоэлектрических охладителей показан на рис. 9.7. Данные о твердотельных термоэлектрических охладителях приведены в работе [62].

Коэффициент усиления. ППУ в зависимости от применяемого числа каскадов имеют общее усиление 10 ... 50 дБ. Многокаскадное построение усилителей применяется для того, чтобы предельно снизить общую температуру шума приемного устройства, а также обеспечить ее постоянство при изменении усиления каскадов во время эксплуатации. При этом в первых каскадах используются ППУ, а в последующих — усилители на туннельных диодах или на транзисторах. Если в предварительном усилителе применяется каскадное включение двух ППУ, то для их накачки используются отдельные генераторы, работающие на разных частотах. Этим обеспечивается постоянство характеристик и высокая надежность работы приемного устройства.

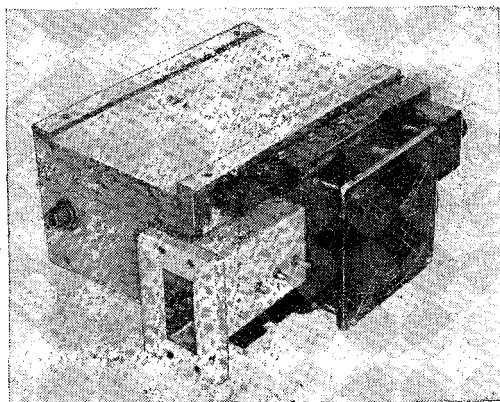


Рис. 9.8. Параметрический усилитель LA04 фирмы NEC для аппаратуры спутниковой связи

Коэффициент усиления однокаскадных ППУ обычно составляет 10 ... 15 дБ. Работа при более высоких значениях усиления нецелесообразна в связи с ростом нестабильности коэффициента усиления, характерного для усилителей регенеративного типа.

Одним из самых существенных дестабилизирующих факторов ППУ кроме нестабильности рабочей температуры является изменение мощности генератора накачки. Даже незначительное изменение мощности генератора накачки (всего на 0,1 дБ) в отдельных случаях приводит к изменению усиления на 1,6 дБ [251]. Поэтому для уменьшения нестабильности усиления применяются схемы автоподстройки мощности и термостатирование. Нестабильность усиления при автоматической регулировке мощности накачки составляет $\pm 0,1 \dots \pm 0,5$ дБ/ч. Примерами эффективного применения авторегулировки мощности накачки и термостабилизации для стабилизации коэффициента усиления могут служить следующие ППУ.

Выпускаемый фирмой NEC двухкаскадный ППУ на $f=3,7 \dots 4,2$ ГГц для наземных станций спутниковой связи имеет нестабильность усиления $\pm 0,3$ дБ в неделю. Это достигнуто применением схемы автоподстройки мощности накачки и термоэлектрического охлаждения до $T=233$ К [251]. В другом двухкаскадном ППУ

с транзисторным усилителем на $f=7,25 \dots 7,75$ ГГц, выпускаемой фирмой LCT для применения в наземных станциях спутниковой связи военного назначения, нестабильность коэффициента усиления указанными способами была доведена до $\pm 0,3$ дБ за 4,5 тыс. ч работы [246]. Параметры этого усилителя приведены в табл. 9.5.

Полоса усиления. Большинство зарубежных ППУ имеют полосу усиления 5 ... 12,5% при уменьшении усиления на 1 дБ. Наиболее широкополосными являются ППУ, выпускаемые фирмой NEC для наземных станций спутниковой связи на $f=3,7 \dots 4,2$ ГГц. Их полоса усиления составляет 500 МГц (12,5%) при уменьшении усиления на 1 дБ [251]. Японской фирмой NTT разработан ППУ на $f=20$ ГГц с $K_y=10$ дБ в полосе 2400 МГц [249].

Для получения широкой полосы усиления в ряде случаев применяются балансные схемы [248]. Например, английским исследовательским центром SERL разработан двухдиодный ППУ на частоту 12 ГГц с полосой усиления 660 МГц. В этом усилителе применен специально созданный варактор с частотой собственного резонанса 42 ГГц. Полоса этого усилителя может быть расширена до 960 МГц при введении элементов компенсации в сигнальную цепь [243]. Широкая полоса усиления ППУ обеспечивает многоканальную работу аппаратуры связи и способствует увеличению ее надежности, так как некоторые изменения частотной характеристики усиления в процессе эксплуатации не приводят к заметному уменьшению усиления на рабочих частотах этой аппаратуры.

Динамический диапазон. Применяемые в современных связных и радиолокационных системах ППУ обладают достаточно большим динамическим диапазоном (D), который оценивается отношением максимальной мощности входного сигнала в линейном режиме к минимальной мощности, соответствующей уровню шумов на входе ППУ. Для мал шумящих усилителей D принято характеризовать мощностью входного сигнала, который соответствует верхней границе линейности части амплитудной характеристики усилителя. На практике это значение принято определять как максимальную мощность на входе усилителя, при которой коэффициент усиления уменьшается не более чем на 1 дБ относительно усиления в линейном режиме.

Наибольший динамический диапазон имеют ППУ, разработанные в исследовательском центре Post Office Research Centre (Англия), верхняя граница которого достигает — 27 дБм (2 мкВт) [244]. ППУ, выпускаемые фирмой Cutler—Hammer, имеют верхнюю границу динамического диапазона — 33 дБм, а ППУ фирмы NEC — 60 дБм [251].

Габариты и масса ППУ зависят от рабочей частоты, сложности схемы усилителя, типа и конструкции применяемых генераторов накачки, ферритовых циркуляторов и системы охлаждения. Простейшие однокаскадные ППУ без охлаждения имеют объем 60 ... 300 см³ и массу 140 ... 500 г. Среди них наиболее компактными и легкими являются бортовые ППУ. Например, однокаскадный ППУ, разработанный фирмой Cutler—Hammer для аппаратуры космического корабля (см. табл. 9.5) вместе с твердотельным источником питания и генератором на диоде Ганна с удвоителем частоты, имеет объем 196 см³ и массу 400 г.

Сложные многокаскадные ППУ с термоэлектрическим охлаждением и со стабилизацией мощности накачки имеют объем более 6000 см³ и массу до 9 кг [251]. Примером аналогичного усилителя является ППУ типа LA04 фирмы NEC для наземной аппаратуры спутниковой связи, демонстрировавшийся на выставке в Москве в декабре 1978 г. (рис. 9.8). В его состав входят параметрический усилитель на варакторе, генератор на диоде Ганна и усилитель на полевых транзисторах. В блоке усилителя для обеспечения малого уровня шумов и высокой стабильности усиления применена термоэлектрическая стабилизация температуры.

В диапазоне частот 3,7 ... 4,2 ГГц этот усилитель обеспечивает усиление до 60 дБ в полосе 500 МГц и динамический диапазон с верхней границей мощности на входе — 60 дБм. Усилитель LA04 имеет три модели (литера), различающиеся по шумовой температуре. Гарантируемая шумовая температура этих моделей составляет соответственно 45, 55 и 60 К. Общая потребляемая мощность 200 Вт, $m=9$ кг и габаритные размеры блока 250×200×125 мм. Усилитель работает при $t_{\text{окр}}=0 \dots +40^{\circ}\text{C}$. К усилителю прилагается блок управления, в состав которого входят органы регулирования питания, контрольные устройства и аварийная сигнали-

зация. Габаритные размеры этого блока составляют $480 \times 320 \times 132$ мм и $m = 18$ кг.

ППУ с криогенными установками очень сложны, имеют большие размеры и массу. По этим причинам, несмотря на рекордно низкие шумы, они не получили массового применения.

Долговечность. Во всех новых зарубежных разработках ППУ для повышения их долговечности и надежности клистронные генераторы накачки заменяются твердотельными генераторами, имеющими низковольтное питание, высокую стабильность мощности и большой срок службы. Создаются также новые варакторы, способные работать при большой мощности в трактах сигнала и имеющие высокие пробивные напряжения [243].

Однако о достигнутой долговечности ППУ в литературе имеются ограниченные сведения. Известно, например, что долговечность однокаскадных бортовых ППУ фирмы Westinghouse характеризуется наработкой на отказ более 20 тыс. ч [248]. Фирма NEC гарантирует бесперебойную работу ППУ в наземных станциях спутниковой связи на $f = 3,7 \dots 4,2$ ГГц без периодического технического обслуживания со средней наработкой на отказ 500 тыс. ч. При этом обеспечивается стабильность усиления в пределах $\pm 0,1$ дБ в час, $\pm 0,2$ дБ в день и $\pm 0,5$ дБ в неделю [251].

Дальнейшее развитие ППУ осуществляется в направлениях освоения все более высокочастотных диапазонов, снижения температуры шума за счет повышения качества варакторов и повышения частоты накачки, создания более простых и надежных конструкций ППУ при использовании твердотельных генераторов накачки с низковольтным питанием и применения узлов и блоков ППУ в интегральном исполнении [61]. Вместе с тем наблюдается повышенный интерес к созданию неохлаждаемых ППУ, с помощью которых уже сейчас достигнуты также довольно низкие уровни шума.

Несмотря на создание сверхмалощумящих усилителей на полевых транзисторах, ППУ продолжают оставаться вне конкуренции в диапазоне частот выше 18 ГГц, который пока малодоступен для полевых транзисторов.

9.5. УСИЛИТЕЛИ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Достигнутые успехи в создании биполярных и полевых СВЧ транзисторов (см. рис. 7.1) позволили про-

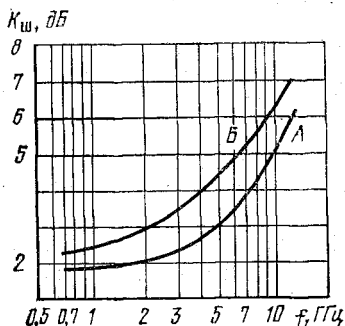


Рис. 9.9. Зависимость коэффициента шума узкополосных (А) и широкополосных (Б) транзисторных усилителей от частоты

двинуть рабочий диапазон транзисторных усилителей до 18 ГГц [63]. Созданные транзисторные усилители СВЧ диапазона по своим техническим характеристикам, простоте конструкции и надежности успешно конкурируют с ЛБВ и усилителями на полупроводниковых СВЧ диодах. По сравнению с усилителями на СВЧ диодах транзисторные усилители не нуждаются в применении развязывающих циркуляторов, а также гене-

раторов накачки, являющихся составной частью параметрических усилителей.

В зависимости от функционального назначения можно выделить две группы транзисторных СВЧ усилителей — входные малошумящие и выходные (промежуточные) усилители мощности [63].

Малошумящие усилители. Важнейшей характеристикой входных малошумящих усилителей является их коэффициент шума. Минимальные значения $K_{ш}$, достигнутые в усилителях СВЧ на транзисторах, приведены на рис. 9.9 [248]. Наименьшие значения коэффициента шума относятся к узкополосным преимущественно однокаскадным усилителям и составляют 2 дБ на частоте 1 ГГц, 3 дБ на частоте 5 ГГц и около 5 дБ на частоте 10 ГГц.

Широкополосные многокаскадные усилители имеют несколько больший минимальный коэффициент шума, чем узкополосные. Он составляет около 2,5 дБ на $f=1$ ГГц, 4,5 дБ на $f=5$ ГГц и 6,5 дБ на $f=10$ ГГц. Усилители на частоты до 4...5 ГГц обычно конструируются на Si биполярных транзисторах, а на более высоких частотах — на GaAs полевых транзисторах с барьером Шоттки. Отдельные фирмы изготавливают унифицированные серии, содержащие большое количество типов усилителей, различающихся по диапазону рабочих частот, коэффициентам шума и усиления и по выходной мощности.

Фирма Watkins—Johnson выпустила сводный ката-

лог малошумящих транзисторных усилителей, в котором содержатся сведения о технических характеристиках 260 типов усилителей 29 серий [79]. Среди них 124 типа усилителей на дискретных компонентах, 41 тип тонкопленочных усилителей и 95 типов усилителей мощности. Усилители на дискретных компонентах созданы на $f = 0,05 \dots 4,2$ ГГц с полосой пропускания от десятков процентов до октавы и более. Коэффициент шума этих усилителей в зависимости от частоты и полосы пропускания составляет 2,5 ... 8 дБ, $K_y = 12 \dots 60$ дБ и $P_{\text{вых}} \leq 10$ мВт. Тонкопленочные усилители созданы на $f = 1 \dots 6,4$ ГГц с полосой пропускания от 10% до октавы. Они имеют $K_y = 12 \dots 60$ дБ, $K_{\text{ш}} = 4 \dots 10$ дБ и $P_{\text{вых}} \leq 20$ мВт. Большинство этих усилителей имеют встроенные источники питания и по своим эксплуатационным характеристикам отвечают требованиям специальной техники с гарантией работы в течение 1 года.

Американская фирма Aprlica в своем каталоге также приводит сведения по 186 типам малошумящих усилителей и усилителей мощности [86]. Малошумящие усилители работают на $f = 0,5 \dots 12,4$ ГГц с полосой до октавы и более. Они имеют $K_{\text{ш}} = 2,5 \dots 10$ дБ, $K_y = 14 \dots 50$ дБ и $P_{\text{вых}} \leq 30$ мВт. Указанные усилители предназначены для замены ЛБВ. Источники питания у них встроенные, работающие от сети переменного тока 110 и 220 В, и по своим эксплуатационным характеристикам отвечают требованиям самолетной и космической аппаратуры.

Фирма Avantek разрабатывает широкополосные усилители на GaAs-полевых транзисторах, удовлетворяющие требованиям специальной техники. Среди них, в частности, представляют интерес многокаскадные усилители на $f = 7 \dots 18$ ГГц с $K_y = 25$ дБ и $K_{\text{ш}} < 10$ дБ, а также двухкаскадные модули с $K_y = 12$ дБ в диапазонах частот 8 ... 13 и 7 ... 15 ГГц [253].

Максимальная рабочая частота промышленных типов транзисторных усилителей ежегодно повышается, а коэффициент шума снижается, особенно в связи с успехами в разработке полевых транзисторов. В 1976 г. максимальная рабочая частота составляла 18 ГГц, однако в настоящее время в США растет количество заказов на разработку транзисторных усилителей на более высокие частоты — вплоть до 30 ГГц [62].

В ближайшее время малошумящие усилители на

Таблица 9.6

**Основные параметры малошумящих усилителей
на транзисторах**

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$K_{ш}$, дБ	$K_{у}$, дБ	$P_{\text{вых}}$, мВт
A2231 ¹⁾	Aertech	0,2...0,4	2	25	3
VSP7431A ¹⁾	Varian	0,5...1,0	2,5	25±1	10
VSP7431K ¹⁾	"	0,5...1,0	2,5	40±1	10
VSL7441K ¹⁾	"	1,0...2,0	3,5	40±1	10
VSL7441M ¹⁾	"	1,0...1,4	2,25	25	3
AM4080 ¹⁾	Avantek	2,0...4,0	3,8	35	8
LA0412 ¹⁾	Nippon Electric Co.	3,7...4,2	1,5	60	10
WJ5300 ²⁾	Watkins — Johnson	4,0...8,0	7	6±0,3	1
WJ5310-301 ²⁾	То же	8,0...12,0	8,5	10±1	5
WJ5310-305 ²⁾	"	8,0...12,0	8,5	30±1,5	5
WJ5320-5 ²⁾	"	12,0...18,0	8	20	7
735SL ²⁾	Amplifica	11,7...12,2	3,6	30	10

¹⁾ На биполярных транзисторах.

²⁾ На полевых транзисторах.

полевых транзисторах могут стать доминирующими среди других малошумящих усилителей во всем частотном диапазоне 1 ... 30 ГГц. Усилители на GaAs-полевых транзисторах привлекают внимание многих потребителей из-за оптимальных сочетаний важнейших характеристик: полосы пропускания, низкого уровня шума, большого коэффициента усиления, малых размеров и массы, а также небольшой мощности питания.

Параметры отдельных типов малошумящих усилителей на СВЧ транзисторах приведены в табл. 9.6. Как видно из таблицы, многие типы транзисторных усилителей имеют октавную полосу пропускания и выходную мощность в пределах до 10 мВт. Коэффициент усиления однокаскадных усилителей не превышает 10 дБ, а многокаскадных 60 дБ [253]. Минимальный коэффициент шума, полученный к настоящему времени на промышленных образцах усилителей, составляет 1,2 дБ на частоте 4 ГГц, 2 дБ на частоте 8 ГГц, 3,0 дБ на частоте 12 ГГц и 5,0 дБ на частоте 18 ГГц (см. рис. 9.2) [55].

Самый низкий коэффициент шума достигнут фирмой NEC при разработке усилителя на GaAs-полевых транзисторах для наземных станций спутниковой связи. Его

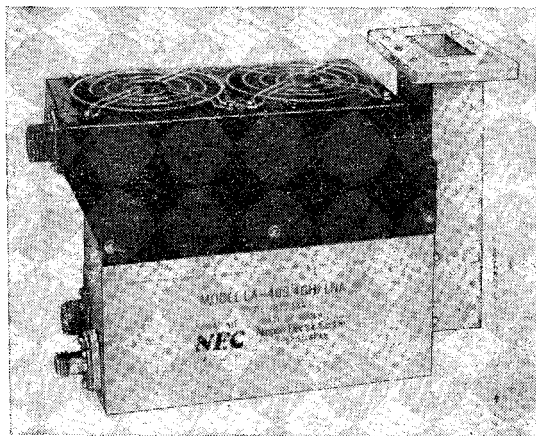


Рис. 9.10. Усилитель на полевых транзисторах типа LA409 фирмы NEC для наземных станций спутниковой связи

шумовая температура на $f=3,7 \dots 4,2$ ГГц составляет 90 К (коэффициент шума 1,15 дБ). Образцы этих усилителей демонстрировались фирмой NEC на выставке в Москве в декабре 1978 г. (см. рис. 9.10).

Усилитель LA409 на $f=3,7 \dots 4,2$ ГГц имеет $K_y = 50 \dots 60$ дБ при неравномерности усиления до $\pm 0,5$ дБ и высокой стабильности усиления во времени. Изменения усиления составляют $\pm 0,1$ дБ в час, $\pm 0,2$ дБ в день и $\pm 0,3$ дБ в неделю. Габаритные размеры усилителя $189 \times 250 \times 100$ мм и масса 7 кг. Усилитель содержит твердотельный источник питания от сети переменного тока $115 \text{ В} \pm 10\%$ с $f=50$ Гц и общей потребляемой мощностью 160 Вт. Фирма NEC гарантирует надежную работу усилителя без постоянного технического обслуживания со средней наработкой на отказ 150 тыс. ч при работе в условиях относительной влажности до 95% при $+40^\circ\text{C}$ и при изменении $t_{\text{опр}} = -50 \dots +50^\circ\text{C}$.

В последнее время наметилась тенденция создания усилителей на полевых транзисторах в диапазоне частот ниже 4 ГГц, где пока доминируют усилители на биполярных транзисторах. На этом участке диапазона уже получены очень низкие значения $K_{\text{ш}} \approx 1 \dots 2$ дБ [55]. Лучшие значения $K_{\text{ш}}$, полученные на биполярных транзисторах, составляют 2,7 дБ на $f=4$ ГГц, 2 дБ на $f=3$ ГГц и 1,5 дБ на $f=1,5$ ГГц [237]. Снижение коэф-

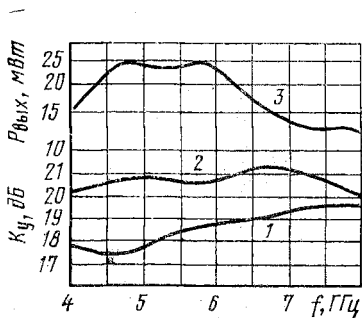


Рис. 9.11. Частотные характеристики коэффициента усиления (1), коэффициента шума (2) и выходной мощности (3) транзисторного усилителя

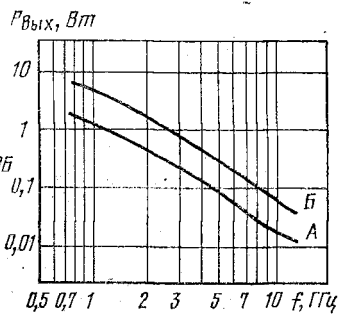


Рис. 9.12. Зависимость выходной мощности широкополосных (А) и узкополосных (Б) транзисторных усилителей от частоты

коэффициента шума полевых транзисторов отмечается и на более высоких частотах. Например, фирма Hewlett—Packard в промышленном образце транзистора HFET1000 достигла $K_{ш}=3,6$ дБ на $f \approx 10$ ГГц [237], а фирма Hughes в лабораторных условиях получила $K_{ш}=5$ дБ на $f=17$ ГГц.

Типичные частотные характеристики широкополосного транзисторного усилителя на полевых транзисторах с барьером Шоттки фирмы Watkins—Johnson приведены на рис. 9.11. Этот усилитель собран по балансной схеме из трех однотипных модулей и имеет $m=285$ г, питается от источника постоянного тока мощностью около 2 Вт. В октавной полосе частот (4 ... 8 ГГц) он обеспечивает $K_y \geq 20$ дБ и $K_{ш}=6,5 \dots 8,5$ дБ [253].

В узкой полосе частот транзисторные усилители имеют более низкий коэффициент шума и лучшую равномерность АЧХ. В качестве примера может быть указан транзисторный усилитель на $f=5,9 \dots 6,4$ ГГц, выпускаемый этой же фирмой для аппаратуры космической связи. В полосе частот 500 МГц его $K_y=33 \pm 0,5$ дБ и $K_{ш}=4,2 \dots 4,5$ дБ [253].

Усилители мощности. Важнейшими характеристиками усилителей мощности являются выходная мощность, коэффициент усиления и КПД. Максимальные значения $P_{вых}$, достигнутые в усилителях СВЧ на транзисторах, показаны на рис. 9.12. Кривая (А) относится к линейным усилителям, которые в отличие от обычных усилителей мощности (кривая Б) имеют большой динамиче-

Таблица 9.7

**Параметры отдельных типов линейных усилителей
мощности на биполярных транзисторах**

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, Вт	K_y , дБ
A4751	Acrodune Industries	1...2	1	30
LWA 0824—1	Microwave Power Dev.	0,8...2,4	1	$27 \pm 1,5$
LWA 1020	То же	1...2	5	44
LWA 1020—5		1...2	5	$32 \pm 1,0$
Нет свед.	RCA	1...2	8	26

ский диапазон, малые нелинейные искажения, большой коэффициент усиления и широкий диапазон частот, хотя и уступают последним по выходной мощности и КПД. Для достижения указанных преимуществ в линейных усилителях применяют специальные стабилизирующие резисторы и согласующие цепочки (резисторы, конденсаторы, индуктивности) в цепи эмиттера или специальные транзисторы, стабилизирующие элементы которых размещены непосредственно в корпусе прибора [63].

В табл. 9.7 приведены параметры отдельных типов линейных усилителей, выпускаемых различными фирмами. Среди них можно отметить трехкаскадный усилитель LWA1020 на шести транзисторах, имеющий общий $K_y \approx 44$ дБ. Выходной каскад этого усилителя построен по балансной схеме, что позволило повысить его динамический диапазон. Усилитель имеет следующие характеристики: неравномерность усиления в рабочем диапазоне частот ± 1 дБ, КСВ входа и выхода менее 2, подавление гармоник не менее 20 дБ, $K_{ш} \leq 10$ дБ и $\eta \approx 5\%$. Усилитель питается от источника с $U = 24$ В и $I = 3,9$ А.

Другой усилитель, разработанный фирмой RCA, в этом же диапазоне частот имеет $P_{\text{вых}} > 8$ Вт [247]. Он также собран на шести транзисторах (4 транзистора 2N5920 в первых каскадах и 2 транзистора TA8170 в выходном каскаде). Усилитель питается от источника с $U = 17$ В и $I = 2,8$ А. Его общий КПД = 15%.

Линейные широкополосные транзисторные усилители получают все более широкое применение в приемно-передающих устройствах аппаратуры связи и в измерительной технике.

Наиболее мощными являются транзисторные усилители, работающие на транзисторах с отсечкой коллекторного тока (см. кривую *B* на рис. 9.12). При разработке этих усилителей основное внимание уделяется достижению максимальной мощности и наибольшего КПД.

Как уже указывалось, зарубежными фирмами выпускается большое число типов транзисторных усилителей мощности. Например, только одна фирма Watkins—Johnson выпускает 95 типов усилителей с повышенной выходной мощностью [79]. Эти усилители созданы на $f=0,05 \dots 6$ ГГц с полосой пропускания от 10% до октавы, $P_{\text{вых}}=0,1 \dots 2$ Вт, $K_{\gamma} \leq 60$ дБ и $K_{\text{ш}}=6 \dots 10$ дБ. Они в основном имеют встроенные твердотельные источники питания и их эксплуатационные характеристики отвечают высоким требованиям. В частности, они работают при $t_{\text{окр}}=-54 \dots +71^{\circ}\text{C}$. Гарантийный срок службы составляет не менее года.

Усилители фирмы Aprlica по уровню выходной мощности делятся на три вида [86]. Усилители средней мощности созданы на $f=0,5 \dots 8,4$ ГГц с $P_{\text{вых}}=25 \dots 160$ мВт, $K_{\text{ш}}=3 \dots 12$ дБ и $K_{\gamma}=14 \dots 50$ дБ. Мощные усилители с $P_{\text{вых}} \leq 2$ Вт созданы на $f=0,5 \dots 4$ ГГц с $K_{\gamma}=14 \dots 50$ дБ и $K_{\text{ш}}=7 \dots 11$ дБ. Мощные усилители в режиме класса С имеют $P_{\text{вых}}=2 \dots 25$ Вт на $f=0,6 \dots 2,7$ ГГц. Большинство усилителей фирмы Aprlica имеют также встроенные источники питания, работающие от сети переменного тока напряжением 110 и 220 В с частотой 50 ... 40 Гц. По эксплуатационным характеристикам эти усилители отвечают требованиям, предъявляемым к самолетной и космической аппаратуре.

Зарубежные фирмы продолжают разрабатывать мощные транзисторные усилители на более высокие частоты и с большей выходной мощностью. Одним из примеров наиболее высокочастотных транзисторных усилителей является усилительный модуль, созданный на основе сложения мощностей четырех Si-биполярных транзисторов с мощностью 1 Вт на частоте 10 ГГц [249]. Этот модуль на $f=7,5 \dots 8,2$ ГГц имеет $P_{\text{вых}}=3$ Вт при $K_{\gamma}=7$ дБ и КПД=17%. При его конструировании основное внимание уделялось тщательному согласованию входных и выходных сопротивлений каждой ячейки усилителя. Модуль содержит встроенный резонатор и устройства для обеспечения водяного охлаждения. Его

габаритные размеры $6,4 \times 64 \times 32$ мм. Среди наиболее мощных транзисторных усилителей можно отметить, в частности, широкополосный мощный усилитель на $f=0,96 \dots 1,22$ ГГц с $P_{\text{вых}}=160$ Вт в непрерывном режиме при $K_y=20$ дБ [252]. Такая большая мощность достигнута в результате сложения мощностей четырех согласованных биполярных транзисторов с помощью гибридного сумматора. Каждый транзистор имеет $P_{\text{вых}}=40$ Вт, минимальный $K_y=6$ дБ и согласован для работы в широкой полосе частот. Усилитель содержит также два задающих каскада мощностью 5 Вт каждый. Общие габариты усилителя составляют $216 \times 108 \times 25$ мм.

Для ряда специальных применений созданы и продолжают разрабатываться широкополосные транзисторные усилители, полоса пропускания которых превышает октаву [55]. Отдельные примеры таких усилителей приведены в табл. 9.8. Указанные усилители имеют сравнительно небольшой коэффициент усиления с изменением его значений на краях полосы пропускания до ± 2 дБ. Коэффициент шума этих усилителей лежит в пределах 5 ... 8 дБ.

Таблица 9.8

Параметры отдельных типов широкополосных транзисторных усилителей

Тип прибора	Фирма-изготовитель	f , ГГц	$P_{\text{вых}}$, мВт	K_y , дБ	$K_{\text{ш}}$, дБ
724CSL	Amplica	2,5...7,5	90	$22 \pm 2,0$	5
8051—1002	Microwave Corp.	2,5...7,0	20	$20 \pm 1,5$	6
N6255—3	Narda	8...18	3	$10 \pm 1,0$	8
AMT18018	Avantek	8...18	5	$40 \pm 1,25$	9

При изготовлении транзисторных усилителей дециметрового диапазона используются преимущественно дискретные компоненты и корпусные транзисторы, а в сантиметровом диапазоне — пленочные схемы и бескорпусные транзисторы.

Успехи в создании мощных транзисторов и применение различных способов суммирования мощностей отдельных транзисторов и усилительных модулей открыли возможность для разработки мощных твердотельных передатчиков импульсного и непрерывного режимов. Фирмой Westinghouse создан твердотельный передатчик на $f=1,2 \dots 1,3$ ГГц с $P_{\text{вых}}=1$ кВт в непрерывном ре-

жине [256]. В состав этого передатчика входит 12 усилительных модулей на биполярных транзисторах. Каждый модуль содержит 8 транзисторов с выходными мощностями 3, 15 и 30 Вт. Создание такого передатчика оказалось возможным благодаря применению оригинальной схемы сложения мощностей и современной техники отвода тепла. Этой же фирмой ранее был создан твердотельный импульсный передатчик на $f=1,25$ ГГц с $P_{и}=1$ кВт при $\tau=1$ мс. Указанная мощность получена также суммированием мощностей 12 усилительных модулей с мощностью 10 Вт каждый. Модули содержат по 6 транзисторов с $P_{вых}=10$ и 30 Вт [235].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В середине 60-х годов разработчики различной РЭА стали все больше ориентироваться на твердотельные СВЧ приборы, имея в виду их относительно малые размеры и массу, небольшое потребление электроэнергии и практически неограниченный срок службы. Высказывалось мнение о том, что твердотельные приборы в перспективе заменят электровакуумные, поэтому в ряде стран заметно сократились ассигнования на разработку новых типов электровакуумных СВЧ приборов [64]. Однако надежды на намечавшуюся замену всех электровакуумных приборов твердотельными не оправдались, так как они не могут заменить многие виды генераторных и усилительных электровакуумных приборов с высокой выходной мощностью. В полупроводниковых приборах преобразование энергии постоянного тока в энергию СВЧ колебаний происходит в твердом теле, размеры и масса которого очень малы и уменьшаются с ростом частоты. Непреобразованная часть энергии постоянного тока должна рассеиваться относительно малой массой прибора. Поэтому увеличение выходной мощности этих приборов ограничено и сдерживается серьезной проблемой отвода тепла [18, 258]. В электровакуумных СВЧ приборах преобразование постоянного тока в СВЧ энергию осуществляется в вакууме. Сбор и рассеяние непреобразованной части энергии чаще всего происходит на коллекторе, размеры которого не связаны с рабочей частотой прибора. Это дает возможность развивать размеры и массу коллектора для достижения требуемой выходной мощности прибора.

Сравнение достигнутой в настоящее время выходной мощности на промышленных электровакуумных и твердотельных СВЧ приборах показано на рис. 1, а и б. Как видно из этих рисунков, электровакуумные приборы имеют значительное преимущество перед твердотельными по выходной мощности и перекрытию частотного диапазона. К этому следует добавить, что в последнее время получены значительные успехи по дальнейшему увеличению мощности электровакуумных приборов [64]. Например, в сантиметровом диапазоне недавно создан сверхмощный магнетрон, выходная мощность которого на $f \approx 3$ ГГц составляет 1700 МВт в импульсе при $\eta = 35\%$ [260]. В миллиметровом диапазоне созданы образцы гиротронов (мазеров на циклотронном резонансе) с $P_{\text{вых}} = 10$ кВт и $P_{\text{и}} = 2 \dots 8$ МВт [262].

Повышение выходной мощности твердотельных СВЧ приборов достигается в основном в результате сложения мощностей нескольких приборов. Однако, как показывает опыт, получение больших мощностей от одного прибора обходится значительно дешевле, чем от множества маломощных приборов [258]. В этом отношении мощные электровакуумные СВЧ приборы имеют бесспорные преимущества.

Основными достоинствами твердотельных СВЧ приборов всегда считались их большой срок службы и высокая надежность. Вместе с тем опыт эксплуатации

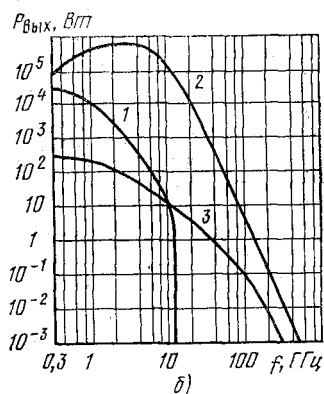
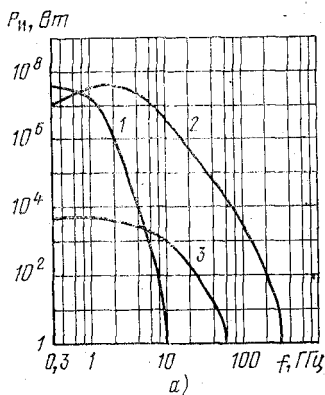


Рис. 1. Максимальные значения выходной мощности СВЧ приборов в импульсном (а) и непрерывном (б) режимах: 1 — с электростатическим управлением; 2 — с электродинамическим управлением; 3 — на основе твердого тела

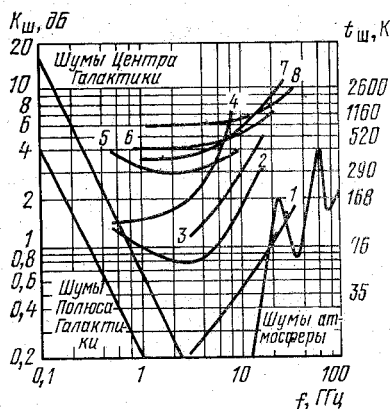


Рис. 2. Минимальные значения коэффициента шума усилительных СВЧ приборов:

1 — охлаждаемые ППУ; 2 — неохлаждаемые ППУ; 3 — на полевых; 4 — на биполярных транзисторах; 5 — на полевых тетродах; 6 — на туннельных диодах; 7 — на ЛБВ; 8 — смесительные диоды

ших усилителей. Применение твердотельных малошумящих СВЧ усилителей в приемных устройствах обеспечило получение рекордно низких значений коэффициента шума, оказавшихся недоступными для электровакуумных малошумящих усилителей [22]. Сравнение достигнутых в настоящее время значений коэффициента шума твердотельных и электровакуумных малошумящих СВЧ усилителей показано на рис. 2. Как следует из этого рисунка, параметрические усилители (охлаждаемые и неохлаждаемые), усилители на полевых и биполярных транзисторах и полевых СВЧ тетродах имеют значительно меньший коэффициент шума, чем сверхмалошумящие ЛБВ.

В связи с имеющимися преимуществами твердотельные СВЧ приборы постепенно вытесняют аналогичные по назначению малошумящие отражательные клистроны, ЛОВО, усилительные малошумящие и малошумящие ЛБВ, разработки и выпуск которых заметно сокращаются.

В настоящее время стало очевидным, что для удовлетворения потребности новых радиоэлектронных систем в активных элементах необходимо *сбалансированное*

твердотельных систем пока не подтвердил этого. Еще ни одна полностью твердотельная система из-за недостаточной надежности полупроводниковых СВЧ приборов не отработала ожидаемого времени [258]. Это объясняется, с одной стороны, малым опытом эксплуатации систем, а с другой — недостаточной устойчивостью твердотельных СВЧ приборов к воздействиям эксплуатационных факторов.

Беспорные достоинства твердотельных СВЧ приборов проявились в создании малошумящих генераторов и малошумящих

развитие как электровакуумных, так и твердотельных СВЧ приборов, а также разработка новых приборов с использованием принципов вакуумной и полупроводниковой электроники. Только многообразие активных элементов, каждый из которых обладает своими достоинствами, позволяет оптимизировать выбор этих элементов применительно к конкретным требованиям разрабатываемой электронной системы [258].

Основные характеристики существующих электронных приборов СВЧ, их отличительные особенности и прогнозы о дальнейшем развитии в ближайшее время приведены в таблице [263]. В ней в обобщенном виде прослеживаются все особенности современного развития электровакуумных и твердотельных СВЧ приборов, в том числе увеличение спроса на мощные электровакуумные и маломощные твердотельные приборы, снижение потребности в маломощных электровакуумных приборах, а также возможные замены одних приборов другими.

Среди электровакуумных СВЧ приборов особенно развиваются те, которые по своим техническим параметрам и эксплуатационным характеристикам не заменяются или не могут быть заменены в ближайшее время твердотельными СВЧ приборами. К ним относятся прежде всего мощные и сверхмощные генераторные и усилительные электровакуумные приборы. В настоящее время основное внимание уделяется разработке импульсных магнетронов коаксиального типа, которые обладают более высокой стабильностью работы и большим сроком службы [71]. Эти магнетроны в ближайшем будущем, вероятно, полностью заменят магнетроны обычной конструкции. Развитие магнетронов непрерывного режима, получивших широкое применение для СВЧ нагрева в промышленности и в бытовых печах, направлено в основном на снижение стоимости киловатт-часа энергии СВЧ путем увеличения КПД, а также на повышение срока службы, надежности и снижение стоимости магнетронов [261]. Если для бытовых СВЧ печей достигнутые мощности являются вполне достаточными, то для обеспечения СВЧ нагрева в промышленных установках требуется дальнейшее увеличение выходной мощности магнетронов.

Усилители магнетронного типа, обладая большой мощностью, высоким КПД, относительно большой поло-

Характеристики существующих приборов СВЧ

Группа, класс приборов	Вид приборов	f, ГГц	Вид перестройки частоты, полоса	Предельная мощность в режимах		K _γ ¹⁾ , дБ	K _ш , дБ	γ, %	Отличительные особенности	Спрос (уровень продаж)	Тенденция развития и перспективные изменения
				Импульсный	Непрерывный						
С сеточным управлением	Триоды	0,3...16	Механическая	10 кВт	10 кВт	8,5...14	—	30...65	Проста конструкция, низкая стоимость	Постоянный	Маломощные заменяются твердотельными генераторами и усилителями
	Тетроды	0,3...1,3	То же	15 МВт	100 кВт	—	—	—	Большая мощность, низкая стоимость	*	Увеличение частоты и мощности, создание модулей
	Обычные магнетроны	0,3...90	*	5 МВт	100 кВт	—	—	30...70	Большая мощность, высокий КПД	Снижается	Импульсные заменяются коаксиальными магнетронами
	Коаксиальные магнетроны	2,7...35	*	3 МВт	—	—	—	25...56	Высокая стабильность, большая мощность, высокий КПД	Повышается	Увеличение частоты, повышение мощности и КПД
Магнетронного типа	Митроны	0,3...11	Электронная	—	500 Вт	—	—	45...72	Линейная электронная перестройка частоты	Снижается	Маломощные заменяются твердотельными генераторами
	ЛОВ М-типа	0,5...18	*	—	5 кВт	—	—	15...50	Большая мощность, электронная перестройка частоты	Повышается	Увеличение КПД и срока службы

Магнетронные усилители	0,4...17	Полоса от 6 до 67%	10 МВт	100 кВт	7...20	—	30...90	Повышается	Увеличение усиления и расширение полосы пропускания
Мощные	0,4...17	Полоса от 8 до 25%	10 МВт	100 кВт	35...60	—	10...50	То же	Увеличение застоя и мощности, повышение КПД
Средней мощности	0,4...18	Полоса до 110%	10 кВт	1 кВт	30...60	—	15...58	•	Увеличение КПД, повышение мощности, увеличение срока службы
Двухрежимные	1...17	Полоса до 67%	1 кВт	0,5 кВт	25...55	—	15...30	•	Увеличение КПД и перепада мощностей
Маломощные	0,5...40	Полоса до 67%	—	3 Вт	25...60	15...30	—	Снижается	Заменяются твердотельными усилителями
Маломощные	1...38	Полоса до 40%	—	100 мВт	25...30	4...10	—	•	Заменяются маломощными твердотельными усилителями
Мощные усилительные	0,3...30	Механическая	48 МВт	1 МВт	25...90	—	35...75	Повышается	Повышение мощности, увеличение КПД и расширение полосы
Генераторные	5...300	То же	10 кВт	1 кВт	—	—	5...14	То же	Маломощные заменяются твердотельными генераторами
Отражательные	0,8...220	Механическая и электронная	—	2,5 Вт	—	—	менее 1	Снижается	Заменяются твердотельными генераторами

Лампы бегущей волны

Ж.пистроны

Продолжение табл.

Группа, класс приборов	Вид приборов	f, Гц	Вид перестройки частоты, полоса	Предельная мощность в режимах		K _y ¹⁾ , дБ	K _ш ²⁾ , дБ	η, %	Оплатительные особенности	Спрос (уровень продаж)	Тенденция развития и перспективы применения
				Импеданс-ном	Непрерывн-ном						
Лампы обрательной волны	ЛЮВ О-типа	1...630	Электронная до 110%	—	10 Вт	—	—	1...5	Высокие рабочие частоты, широкая спектральная перестройка	Снижается	Заменяются твердотельными генераторами
	На лавинно-пролетных диодах	4...100	Электрическая до 30%	120 Вт	3 Вт	—	—	3...18	Высокая предельная мощность, низкий КПД	Повышается	Увеличение выходной мощности и частоты
	На диодах Ганна	2...60	Электрическая до 80%	—	0,3 Вт	—	—	2...12	Высокая предельная частота, малая мощность, низкий КПД	То же	Увеличение выходной мощности и частоты, повышение КПД
Твердотельные СВЧ генераторы	На биполярных транзисторах	0,3...10	Электрическая до 3 октав	—	0,5 Вт	—	—	25...80	Простота конструкции, высокий КПД, широкая перестройка	•	Увеличение частоты и повышение мощности
	На полевых транзисторах	2...20	То же	—	0,1 Вт	—	—	25...75	То же	•	То же
	На туннельных диодах	0,5...18	Широкополосные, до 67%	—	—	10...17	4...7	—	Малые шумы, широкая полоса, малая выходная мощность	Снижается	Заменяются транзисторными усилителями

На лавино-про- летных диодах	4...94	Узкопо- лосные, полоса до 15%	1,2 кВт	100 Вт	5...10	10...35	—	Высокая пре- дельная частота, повышенная вы- ходная мощность	Повыша- ется	Увеличение мощности. Ниже 20 ГГц заменяются транзисторными усилителями
На диодах Ганна	4...40	Широко- полосные, полоса до 67%	—	2 Вт	10...30	7...20	—	Высокая пре- дельная частота, небольшая шумя	Снижается	На частотах ни- же 20 ГГц заме- няются транзистор- ными усилителями
Усилители мощности на биполярных транзисторах	0,3...6	То же	1 кВт	1 кВт	5...10	—	10...20	Простота конст- рукции, повышен- ная мощность	Повыша- ется	Увеличение вы- ходной мощности и полосы
Малошумящие на биполяр- ных транзи- сторах	0,3...6	"	—	—	5...10	1,5...6	—	Простота конст- рукции, малые шу- мы	То же	Увеличение ча- стоты и усиления, снижение шумов
Малошумя- щие на поле- вых транзи- сторах	2...18	"	—	—	5...10	1,2...8	—	То же	"	То же
Неохлаждае- мые параметри- ческие	0,5...16	Узкополос- ные до 12%	—	—	15...20	1,3...2,2	—	Малые шумя, сложность конст- рукции	Снижается	Заменяются транзисторными ма- лошумящими уси- лителями
Охлаждаемые параметриче- ские	0,5...35	То же	—	—	15...20	0,1...0,8	—	Очень малые шу- мы, сложность конструкция	С тенден- цией к сни- жению	Заменяются не- охлаждаемыми уси- лителями

**Твердо-
тельные
СВЧ усилители**

1) Для твердотельных СВЧ усилителей коэффициент усиления приведен из расчета на один каскад.

сой усиления, а также возможностью работы с безмодуляторным питанием, все шире применяются в РЛС дальнего действия, и перед ними открываются новые области применения, например в аппаратуре спутниковой связи и в проектируемых солнечных космических энергетических станциях. Вместе с тем усилителям этого типа присущи некоторые недостатки, в том числе низкий коэффициент усиления, высокий уровень шумов и склонность к самовозбуждению.

Лампы бегущей волны как мощные, так и средней мощности непрерывного и импульсного режимов продолжают занимать важное место в РЭА, обеспечивая большое усиление, широкую полосу пропускания и относительно высокий КПД. Они применяются во многих видах аппаратуры связи, радиолокации и радиопротиводействия, работающей в наземных условиях, на борту самолетов, ракет и в космосе.

В последнее время большое внимание уделяется созданию ЛБВ для бортовой аппаратуры спутниковой связи, в результате чего мощность этих приборов доведена почти до 1 кВт в непрерывном режиме, КПД до 56% и срок службы до 2 лет и более. Ожидается, что КПД подобных ЛБВ достигнет 90% на низкочастотном краю диапазона СВЧ, 60 ... 65% на $f=10 \dots 12$ ГГц и 50% на $f=40$ ГГц и выше. Срок службы ЛБВ для космических объектов предполагается довести до 5 ... 7 лет [260].

Большим достижением явилось также создание двухрежимных ЛБВ, одинаково эффективно работающих в импульсном и непрерывном режимах и отвечающих требованиям современной аппаратуры радиопротиводействия.

Усилительные клистроны по выходной мощности превосходят все остальные мощные приборы СВЧ, обеспечивая, например, на $f \approx 3$ ГГц $P_{\text{и}}=50$ МВт и $P_{\text{вых}} \approx 400$ кВт. Использование в клистропах интенсивных релятивистских пучков обеспечивает на частоте 3 ГГц повышение выходной мощности до 2 ГВт в импульсе при $\tau=30$ нс [66].

К настоящему времени достигнуты определенные успехи в увеличении гарантируемого и среднего срока службы мощных электровакуумных приборов СВЧ. Однако в связи с расширяющимся применением этих приборов в аппаратуре спутниковой связи, бытовых СВЧ

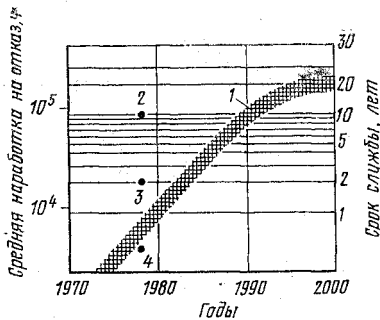


Рис. 3. Тенденции роста срока службы электровакуумных приборов СВЧ:

1 — предполагаемый срок службы; 2 — экспериментальные данные лучших приборов при работе в наземных РЛС; 3 — ЛБВ в космической аппаратуре; 4 — ЛБВ в бортовой авиационной аппаратуре

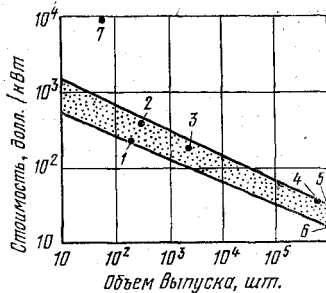


Рис. 4. Зависимость стоимости приборов СВЧ от объема их выпуска:

1 — магнетрон X-диапазона; 2 — клистрон L-диапазона с $P_{\text{н}}=15$ кВт; 3 — клистрон непрерывного режима с $P_{\text{вых}}=2$ кВт; 4 — магнетрон для бытовых СВЧ печей; 5 — клистрон с $P_{\text{н}}=50$ кВт (оценка); 6 — амплитрон (оценка); 7 — приборы для военной техники

печах, а также с намечаемым использованием их в космических энергетических станциях решение проблемы резкого повышения срока службы приобретает особо важное значение. В процессе эксплуатации приборов СВЧ в наземной, бортовой и космической аппаратуре постепенно накапливаются необходимые данные, глубокое изучение которых позволит разработать и внедрить эффективные мероприятия по увеличению их срока службы.

На рис. 3 показаны тенденции роста срока службы электровакуумных приборов СВЧ и экспериментальные данные о наработке лучших образцов этих приборов в различных видах аппаратуры [66]. Например, срок службы лучших десяти СВЧ приборов в радиолокаторе системы ВМЕWS превысил 9 лет, а более ста ЛБВ в космических аппаратах оказался равным 2 годам и более.

Разработчиками продолжают поиски новых конструктивных решений, технологических процессов и материалов с целью снижения стоимости изготовления электровакуумных приборов СВЧ. Например, фирмой Varian разработаны ЛБВ на печатных платах, производственная стоимость которых при изготовлении пар-

тии в несколько тысяч штук составляет всего 65 долл. Производственная стоимость магнетронов, выпускаемых фирмой Litton для бытовых СВЧ печей, при массовом производстве снижается до 30 ... 50 долл. [258]. Данные о стоимости приборов СВЧ в зависимости от объема их производства приведены на рис. 4 [66]. Как видно из этого рисунка, приборы СВЧ для военной техники (выпускаемые в небольшом количестве) стоят около 1000 долл. в пересчете на 1 кВт. В то же время стоимость магнетронов для бытовых СВЧ печей в массовом производстве составляет всего 50 долл. за штуку, т. е. в 20 раз дешевле.

Основными направлениями дальнейшего развития твердотельных СВЧ приборов и устройств являются совершенствование технических характеристик и разработка новых типов полупроводниковых СВЧ диодов и транзисторов, а также создание на их основе генераторов, усилителей и комплексированных СВЧ устройств различного назначения. Ожидается, что выходная мощность IMPATT-диодов вырастет до 15 Вт на $f=10$ ГГц и 2 ... 3 Вт на $f=20$ ГГц и тем самым приблизится к теоретическому пределу, который может быть реализован на полупроводниковых приборах.

Продолжается увеличение выходной мощности диодов Ганна, работающих в непрерывном режиме. В 1980 г. предполагается получить на этих приборах мощность до 2 Вт на $f=6$ ГГц, 1 Вт на $f=10$ ГГц и 0,02 Вт на $f=100$ ГГц [51]. Выходная мощность промышленных образцов биполярных транзисторов в непрерывном режиме достигает 300 Вт на $f=0,3 \dots 1$ ГГц, 20 Вт на $f=2$ ГГц, 10 Вт на $f=3$ ГГц и 1 Вт на $f=6$ ГГц. Частотный предел биполярных генераторных транзисторов расширился до 12 ГГц. Выходная мощность полевых транзисторов приближается к 30 Вт на $f=1$ ГГц, 15 Вт на $f=3$ ГГц и 2 Вт на $f=10$ ГГц. Генераторные полевые транзисторы будут работать на $f=1 \dots 40$ ГГц и составят серьезную конкуренцию диодам Ганна, предназначенным для работы в этом диапазоне.

С появлением высокоэффективных полупроводниковых источников СВЧ энергии определенное развитие получило направление сложения их мощности для создания полностью твердотельных передающих устройств сначала в дециметровом диапазоне, а затем и в длинноволновой части сантиметрового диапазона. Создание

твердотельных передающих устройств развивается двумя путями. Первый путь — создание фазированных антенных решеток, в которых сложение мощностей отдельных источников происходит в пространстве и одновременно с этим при управлении их фазой осуществляется сканирование диаграммы направленности. Второй путь — суммирование мощностей отдельных источников в специальной схеме сложения. В передающих устройствах наиболее широко применяются транзисторы (до 10 ГГц), ЛПД и диоды Ганна, работающие в усилительном режиме. Для сложения мощностей отдельных приборов и усилительных модулей на их основе используются схемы деления и суммирования мощности на различных пассивных СВЧ элементах: тройниках, направленных ответвителях, циркуляторах, балансных мостах и др. Серьезной проблемой при этом является обеспечение минимальных потерь в схемах деления и суммирования мощности и эффективного отвода тепла от активных элементов передающего устройства [8].

Другим направлением развития твердотельных СВЧ приборов, которому уделяется наибольшее внимание, является создание маломощных полупроводниковых приборов и высокочувствительных усилителей на их основе. К настоящему времени создана широкая номенклатура маломощных параметрических диодов, полевых и биполярных транзисторов, диодов Ганна. Маломощные усилители на транзисторах, обладая большей простотой конструкции, меньшей стоимостью, большим динамическим диапазоном и удобствами эксплуатации, привлекают все большее внимание конструкторов аппаратуры. Есть основание полагать, что в дальнейшем они получат самое широкое распространение.

Значительные успехи в создании современных электровакуумных и твердотельных СВЧ приборов стали возможны благодаря развитию и широкому применению машинных методов проектирования, созданию новых материалов с улучшенными свойствами, дальнейшему совершенствованию технологии изготовления приборов и метрологического обеспечения их производства.

С помощью машинного проектирования удалось решить многие сложные задачи по оптимизации конструкции, параметров и режимов работы СВЧ приборов. Многие оригинальные решения, например создание элект-

тронных пушек с теневой управляющей сеткой, много-секционных коллекторов, фокусирующих электростатических и магнитных систем, вначале были тщательно промоделированы на ЭВМ, а затем уже осуществлены в конкретных приборах. Применение этих методов проектирования обеспечило, в частности, успешное решение задачи по повышению КПД ЛБВ для космической связи, оптимизации усиления и полосы пропускания мощных клистронов и ЛБВ, снижению питающих напряжений и уменьшению габаритов СВЧ приборов. Методы машинного проектирования не только избавляют конструкторов от многократного макетирования и ускоряют процесс разработки новых приборов, но и обеспечивают достижение их наиболее высокого технического уровня.

Для разработки и производства электровакуумных и твердотельных СВЧ приборов в последнее время создано много новых материалов, которые способствовали появлению новых приборов (мини-ЛБВ, диодов и транзисторов на арсениде галлия, диодов Ганна на фосфиде индия и др.), а также совершенствованию конструкции и технологии производства выпускаемых СВЧ приборов. В конструкциях этих приборов применяются постоянные магниты из сплава самарий—кобальт, металлы вакуумной плавки, детали из нитрида бора и бериллиевой керамики и др. Наряду с германием и кремнием в разработках СВЧ диодов и транзисторов стали применяться арсенид галлия, фосфид индия, антимонид индия и другие полупроводниковые материалы. Применение, например, арсенида галлия в полевых транзисторах позволило значительно снизить их коэффициент шума и увеличить верхний предел рабочих частот почти до 30 ГГц. В результате использования фосфида индия снижен коэффициент шума усилительных диодов Ганна.

В производство электровакуумных и твердотельных СВЧ приборов внедрены новые и более эффективные технологические процессы. Например, при изготовлении магнетронов для бытовых СВЧ печей стали применяться методы штамповки резонаторных систем, что значительно снизило стоимость этих магнетронов. При изготовлении замедляющих структур в ЛБВ и ЛОВ начали применяться методы фотолитографии. При изготовлении СВЧ диодов и транзисторов внедрены методы ионной имплантации, вакуумного напыления, электронно-лучевой литографии и многие другие технологические опе-

рации и приемы микроэлектроники. Применение этих методов позволило значительно увеличить верхний частотный предел приборов, повысить их выходную мощность, снизить коэффициент шума и повысить надежность работы в тяжелых условиях эксплуатации.

Характерными для большинства электровакуумных и твердотельных приборов СВЧ направлениями их дальнейшего развития, реализуемыми зарубежными фирмами при разработке новых приборов в 1979—1980 гг., являются создание комплексированных устройств (суперкомпонентов), монолитных интегральных СВЧ микросхем и гибридных приборов, а также совершенствование технических и эксплуатационных характеристик перспективных классов и групп приборов СВЧ, в том числе увеличение выходной мощности и КПД, расширение диапазона перестройки частоты и полосы пропускания, снижение собственных шумов, повышение гарантированного и среднего срока службы. При этом большое внимание уделяется освоению новых частотных диапазонов, и в первую очередь, диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн, имея в виду расширение области их практического использования в науке и технике.

Следуя общей тенденции миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры на основе широкого применения БИС, в разработке новых приборов СВЧ и особенно их твердотельных аналогов принимаются меры к сокращению габаритных размеров, массы и энергопотребления этих приборов.

В дальнейшем можно ожидать значительного расширения номенклатуры и объемов продажи на мировом рынке многофункциональных твердотельных приборов СВЧ, в том числе монолитных, выполненных на одном кристалле, мощных и сверхмощных электровакуумных генераторных и усилительных приборов, включая приборы миллиметрового диапазона, а также сокращение выпуска и продажи отдельных видов маломощных электровакуумных приборов СВЧ, заменяемых твердотельными аналогами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девятков Н. Д. Развитие советской электровакуумной СВЧ-электроники (1917—1977 гг.). — Электронная техника. Сер. 1, 1977, вып. 11, с. 3—20.
2. Капица П. Л. Электроника больших мощностей. — М.: АН СССР, 1962. — 195 с.
3. Тагер А. С. Некоторые тенденции развития полупроводниковых приборов СВЧ. — Электронная техника. Сер. 1, 1977, вып. 11, с. 21—38.
4. Коваленко В. Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот. — М.: Сов. радио, 1955. — 344 с.
5. Лебедев И. В. Техника и приборы сверхвысоких частот в 2-х т. — М.: Высшая школа, 1970—1972. — Т. 1. — 438 с., Т. 2. — 374 с.
6. Гайдук В. И., Палатов К. И., Петров Д. М. Физические основы электроники сверхвысоких частот. — М.: Сов. радио, 1971. — 599 с.
7. Федотов Я. А. Электроника, год 2001. — М.: Сов. радио, 1975. — 102 с.
8. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/ Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977. — 350 с.
9. Стальмахов В. С. Основы электроники сверхвысокочастотных приборов со скрещенными полями. — М.: Сов. радио, 1963. — 366 с.
10. Цейтлин М. Б., Кац А. М. Лампа с бегущей волной. — М.: Сов. радио, 1964. — 312 с.
11. Альтшулер Ю. Г., Татаренко А. С. Лампы малой мощности с обратной волной. — М.: Сов. радио, 1963. — 296 с.
12. Резонансные разрядники антенных переключателей/ Под ред. И. В. Лебедева. — М.: Сов. радио, 1976. — 326 с.
13. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. — М.: Сов. радио, 1968. — 480 с.
14. Полупроводниковые диоды: Параметры, методы измерений/ Под ред. Н. Н. Горюнова, Ю. Р. Носова. — М.: Сов. радио, 1968. — 304 с.
15. Стриха В. И., Бузанева Е. В., Радзиевский И. А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. — М.: Сов. радио, 1974. — 248 с.
16. Алфеев В. Н. Радиотехника низших температур. — М.: Сов. радио, 1966. — 368 с.
17. Чернов З. С. Системы с центробежно-электростатической фокусировкой электронного потока. — Радиотехника и электроника. 1956, т. 1, № 11, с. 18—23.
18. Васенков А. А., Срегенский В. Н., Федотов Я. А. Три проблемы твердотельной электроники. — Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. — М.: Сов. радио, 1977, вып. 2, с. 3—9.
19. Срегенский В. Н. Основы применения электронных приборов сверхвысоких частот: Свойства, методы исследований и оценка правильности применения приборов СВЧ. — М.: Сов. радио, 1963. — 416 с.

20. Основы использования магнетронов/ Н. П. Быстрицкий, К. В. Дитман, Н. П. Зайцева и др.; Под ред. Ю. Н. Хлопова. — М.: Сов. радио, 1967. — 334 с.
21. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. — М.: Сов. радио, 1976. — с. 216.
22. Кукарин С. В., Кондратенко П. А. О возможностях твердотельной микроэлектроники в создании новой элементной базы для СВЧ диапазона. — Микроэлектроника, 1974, т. 3, № 6, с. 536—543.
23. Голант М. Б. и др. Минитрон-генератор малой мощности сантиметрового диапазона волн. — Приборы и техника эксперимента, 1972, № 2, с. 252.
24. Голант М. Б., Каплун З. Ф. Генераторы с внешними сверхпроводящими резонаторами. — Электронная техника. Сер. 1, 1977, вып. 11, с. 40—47.
25. Каплун З. Ф. Ограничения стабильности собственной частоты сверхпроводящего резонатора. — Электронная техника. Сер. 1, 1974, вып. 8, с. 3—22.
26. Антипов Г. Я., Мартаков Г. М. Генераторные металлокерамические лампы СВЧ диапазона, триоды и тетроды малой и средней мощности. — М.: Сов. радио, 1969. — 64 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 16).
27. Панин И. С., Панченко Л. В. Импульсные магнетроны. — М.: Сов. радио, 1969. — 72 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 12).
28. Дятлов Ю. В., Козлов Л. Н. Митроны. — М.: Сов. радио, 1967. — 48 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 9).
29. Быстрицкий Н. П. Магнетронные усилители — амплитроны. — М.: Сов. радио, 1966. — 76 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 4).
30. Громыко В. Н., Зайцева Н. П. Лампы обратной волны типа М. — М.: Сов. радио, 1968. — 56 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 14).
31. Калиш П. Р., Ярочкин Н. И. Усилительные клистроны. — М.: Сов. радио, 1967. — 46 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 27).
32. Бунин Г. Г., Васенькин В. А. Отражательные клистроны. — М.: Сов. радио, 1966. — 64 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 5).
33. Жуков Б. С., Перегонов С. А. Лампы бегущей волны. — М.: Сов. радио, 1967. — 46 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 8).
34. Червяков Ю. Г., Кузьмичев Н. П. Лампы обратной волны типа О малой мощности. — М.: Сов. радио, 1966. — 56 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 3).
35. Горбачев А. И., Кукарин С. В. Полупроводниковые СВЧ диоды. — М.: Сов. радио, 1968. — 64 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 13).
36. Бергельсон И. Г., Миц В. И. Транзисторы биполярные. — М.: Сов. радио, 1976. — 56 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 33).
37. Петухов В. М., Талтыгин В. И., Хрулев А. К. Транзисторы полевые. — М.: Сов. радио, 1978. — 64 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 37).

38. Колосов М. В., Перегонов С. А. СВЧ генераторы и усилители на полупроводниковых приборах. — М.: Сов. радио, 1974. — 80 с. — (Элементы радиоэлектронной аппаратуры, № 28).
39. Бадаева О. Н. Состояние и тенденции развития зарубежных приборов М-типа в 1975—1976 гг. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 14. — 56 с. — (Обзоры по электронной технике).
40. Чукина Ю. Н. Зарубежные приборы М-типа, рекламированные в 1975 году. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 4 — 14 с. — (Справочные материалы по электронной технике).
41. Семенова А. Б. и др. Надежность и долговечность зарубежных СВЧ приборов. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 4. — 58 с. — (Обзоры по электронной технике).
42. Горбачевская З. М. Состояние и тенденции развития зарубежных ЛБВО и ЛОВО в 1976 г. — М.: ЦНИИ Электроника, 1977, вып. 5. — 54 с. — (Обзоры по электронной технике).
43. Горбачевская З. М. Состояние и тенденции развития ЛБВ и их полупроводниковых аналогов в 1977 г. — М.: ЦНИИ Электроника, 1978, вып. 4. — 56 с. — (Обзоры по электронной технике).
44. Ессин А. Д. и др. Мощные ЛБВ с низковольтным управлением электронным потоком. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 6. — 66 с. — (Обзоры по электронной технике).
45. Лысова И. К., Корешкова О. Н. ЛБВ импульсного действия с низковольтным управлением электронными пучками. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 16. — 28 с. — (Обзоры по электронной технике).
46. Терехина З. Н. Миниатюризация электровакуумных приборов СВЧ. — М.: ЦНИИ Электроника, 1973, вып. 14. — 48 с. — (Обзоры по электронной технике).
47. Коваленко В. Ф., Бочарина М. Е. Тенденции развития клистронов. — В кн.: Зарубежная электронная техника. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 12, с. 32—66.
48. Бочарина М. Е. Зарубежные клистроны, рекламируемые в 1976 г. — М.: ЦНИИ Электроника, 1977, вып. 1. — 14 с. — (Обзоры по электронной технике).
49. Савельев В. С. Арсенидо-галлиевые СВЧ полевые транзисторы. — М.: ЦНИИ Электроника, 1978, вып. 5. — 52 с. — (Обзоры по электронной технике).
50. Пыхтунова А. И. СВЧ полевые транзисторы на GaAs. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 6. — 54 с. — (Обзоры по электронной технике).
51. Величковский И. А. Состояние и тенденции развития зарубежных полупроводниковых СВЧ приборов в 2-х ч. — М.: ЦНИИ Электроника, 1978, вып. 17. — 64 с. — (Обзоры по электронной технике).
52. Вульгальтер Г. А. и др. Усилительные диоды Ганна. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 11. — 72 с. — (Обзоры по электронной технике).
53. Горбачевская З. А. Состояние и тенденции развития зарубежных ЛБВ, ЛОВ типа О и широкополосных полупроводниковых приборов в 1972 г. — М.: ЦНИИ Электроника, 1973, вып. 9. — 56 с. (Обзоры по электронной технике).
54. Шустова О. Ф. Зарубежные перестраиваемые и стабилизированные генераторы на ЛПД. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 12. — 26 с. — (Обзоры по электронной технике).

55. Горбачевская З. М. Состояние и тенденции развития зарубежных ЛВВО и ЛОВО в 1975 г. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976, вып. 4. — 52 с. — (Обзоры по электронной технике).
56. Шустова О. Ф. Современное состояние производства генераторов и усилителей на ЛПД. — М.: ЦНИИ Электроника, 1977, вып. 9. — 64 с. — (Обзоры по электронной технике).
57. Величковский И. А. Состояние и тенденции развития за рубежом усилителей на ЛПД. — М.: ЦНИИ Электроника, 1975, вып. 4. — 84 с. — (Обзоры по электронной технике).
58. Савин Б. В. Электронные приборы СВЧ. — В кн.: Радиоэлектроника в 1974 году. — М.: НИИЭИР, 1975, вып. 4, с. 7.
59. Тюрикова Н. А. Состояние и перспективы разработок гибридных электронных приборов в США. — Зарубежная электронная техника, 1975, вып. 17. — 48 с.
60. Жеребцова А. А. Состояние разработок диодов Ганна. — Зарубежная электронная техника, 1973, вып. 6, с. 3—51.
61. Переверзев О. М. и др. Параметрические усилители. — В кн.: Радиоэлектроника в 1975 году. — М.: НИИЭИР, 1976, вып. 3, с. 77—86.
62. Осипов Э. В., Борисенко В. Д. Твердотельные криогенные охладители. — В кн.: Зарубежная электронная техника, 1975, вып. 7. — 80 с.
63. Гольдман Д. С. и др. Линейные усилители на биполярных и полевых транзисторах. — Зарубежная радиоэлектроника, 1977, № 1, с. 99—125.
64. Кузьмина В. Г., Савин В. Б. О перспективах разработки и производства электровакуумных приборов СВЧ. — Зарубежная радиоэлектроника, 1978, № 10, с. 98—108.
65. Воробьев В. В., Морозов К. К., Суетенко А. В. Твердотельные устройства СВЧ диапазона. — Зарубежная радиоэлектроника, 1978, № 2, с. 63—85.
66. Нейлос Э. Дж. Новые разработки направленной передачи электромагнитной энергии. — М.: ТИИЭР, 1978, т. 6, № 3, с. 5—22.
67. Microwave Tube DATA Book, 1973—1975, № 30.
68. Microwave Tube DATA Book, 1973, № 31.
69. Microwave Tube DATA Book, 1974, № 32.
70. Microwave Tube DATA Book, 1976, № 36.
71. Microwave Tube DATA Book, 1977, № 39.
72. Semiconductor Diode DATA Book, 1979, № 43.
73. Transistor DATA Book, 1979, № 46.
74. Каталог лаборатории SFD фирмы Varian, 1967.
75. Каталог Introduction to coaxial Magnetrons, 1970.
76. Каталог фирмы Thomson-CSF, 1970.
77. Каталог фирмы Hughes TWTs, 1972.
78. Каталог фирмы Hughes, 1973.
79. Каталог фирмы Watkins-Johnson, 1968, 1973.
80. Каталог фирмы Thomson-CSF, 1975.
81. Каталог фирмы English Electric V., 1974.
82. Каталог фирмы Thomson-CSF, 1975.
83. Каталог The Varian mini-TWT and TWTA story, 1976.
84. Каталог фирмы Varian, 1976.
85. Каталог фирмы Hughes, 1976.
86. Каталог фирмы Amplica, 1976.
87. Каталог фирмы Varian, 1977.
88. Microwave J., 1967, v. 10, № 18, p. 75.

89. *Electronic Design*, 1971, v. 19, № 1, p. 59 a.
90. *Microwave J.*, 1972, v. 15, № 3, p. 10, 22, 45.
91. *Microwave J.*, 1973, v. 16, № 1, p. 20; № 3, p. 47, 48; № 11, p. 31.
92. *Electronic Design*, 1973, v. 21, № 26, p. 79.
93. *Microwave J.*, 1974, v. 17, № 3, p. 34.
94. *Electronic Design*, 1974, v. 22, № 7, p. 30.
95. *Microwave J.*, 1975, v. 18, № 8, p. 10.
96. *Electronic Design*, 1965, v. 13, № 4, p. 17.
97. *Microwave J.*, 1966, v. 9, № 8, p. 139.
98. *Microwave J.*, 1969, v. 12, № 4, p. 61, 64.
99. *Microwave J.*, 1970, v. 13, № 2, p. 60, 62.
100. Радиоприемник прямого усиления для образовательного телевидения. — *Электроника*, 1973, т. 16, № 26, с. 25—27.
101. *Microwaves*, 1970, v. 9, № 1, p. 58.
102. *J. of Microwave Power*, 1970, v. 5, № 4, p. 245.
103. *Electronic Design*, 1971, v. 9, № 23, p. 28, 29.
104. *Microwave J.*, 1971, v. 14, № 9, p. 46.
105. *Microwave J.*, 1972, v. 15, № 7, p. 29; № 4, p. 42.
106. *Aviation Week and Space Techn.*, 1972, v. 96, № 3, p. 10.
107. *Electronics and Power*, 1972, v. 18, № 6, p. 212.
108. *Microwave J.*, 1973, v. 16, № 3, p. 34, 41, 42; № 7, p. 41, 49, 50.
109. *Microwaves*, 1973, v. 12, № 5, p. 42, 47.
110. *Wireless World*, 1973, v. 79, № 1454, p. 412.
111. Гош А. Транзисторы для усилителей систем КТВ. — *Электроника*, 1973, т. 46, № 22, с. 8—10.
112. *Proc. Conf. Microwave-73*, 1973, p. 352.
113. *Proc. IEEE*, 1973, v. 61, № 3, p. 330.
114. *Electronics Weekly*, 1973, № 650, p. 7.
115. *Electronic Design*, 1973, v. 21, № 16, p. 48.
116. Паркер Р. Новые области применения редкоземельных магнитов. — *Электроника*, 1974, т. 47, № 25, с. 39—45.
117. *Microwave J.*, 1974, v. 17, № 8, p. 29, 33.
118. *Microwave J.*, 1975, v. 18, № 4, p. 30, 63, 66, 67; № 6, p. 37; № 9, p. 24; № 12, p. 25.
119. *J. of Microwave Power*, 1975, v. 10, № 2, p. 233; № 4, p. 369.
120. *Electronic Eng.*, 1975, № 572, p. 57.
121. *Electronic Design*, 1975, v. 23, № 25, p. 32, 34.
122. *Microwave J.*, 1976, v. 19, № 8, p. 5, 39, 40, 68.
123. *Microwaves*, 1976, v. 15, № 12, p. 12, 17.
124. *J. of Electronic Eng.*, 1977, № 122, p. 61.
125. *Aviation Week and Space Techn.*, 1971, v. 29, № 8, p. 46.
126. *Microwave J.*, 1971, v. 14, № 5, p. 53, 54, 56, 57.
127. *Microwave J.*, 1972, v. 15, № 5, p. 52, 54.
128. Новые высокоэффективные магниты. — *Электроника*, 1972, т. 45, № 10, с. 22, 23.
129. *Electronics News*, 1972, v. 17, № 883, p. 38, 39.
130. *Microwaves*, 1972, v. 11, № 5, p. 1, 9, 16.
131. *Electronic Design*, 1972, v. 20, № 26, p. 28, 30.
132. *Microwave J.*, 1973, v. 16, № 1, p. 9, 10; № 5, p. 15, 39, 76; № 9, p. 33, 37;
133. Pittack U. J. Dual-mode TWT's. — In: *Microwave-73 Conf. Proc.* — Brighton, England, 1973, 12—21 June, p. 363—369.
134. *Internat. Electron Device Meeting*, Washington, 1973, 3—5 Dec., № 4, p. 399.

135. **Nachrichtentechnik Z.**, 1973, Bd. 26, H. 10, s. 474.
136. **Electronic Eng.**, 1973, v. 45, № 540, p. 57, 59.
137. **Gelnovatch V.** Microwave Device and Circuit Development. — **Microwave J.**, 1976, v. 19, № 6, p. 28, 29.
138. **Microwave J.**, 1974, v. 17, № 3, p. 78; № 9, p. 64.
139. **Microwave J.**, 1974, v. 17, № 5, p. 15, 16, 18, 20.
140. **Microwave J.**, 1974, v. 17, № 3, p. 14, 16, 53; № 8, p. 29, 33.
141. **Microwaves**, 1974, v. 13, № 5, p. 38, 43.
142. **E & E Abstracts**, 1974, v. 77, № 917, p. 840.
143. **Demi D.** et al. Results of the Development of a 700 W 12 GHz TWT for Direct TV Broad-casting Satellites. — In.: **Proc. 4th European Microwave Conf.**, Montreux, Switzerland, 1974, 10—13 Sept., p. 51—55.
144. **Okoshi T.** et al. A High Efficiency X-Band TWT Equipped with a Tilted Electric Field (TEF) Collector. — **Internat. Electron Devices Meeting**, Washington, 1974, p. 498—501.
145. **Electronic Design**, 1974, v. 22, № 7, p. 30.
146. **L'onde Electrique**, 1974, v. 54, № 4, p. 155.
147. **Technische Mitteilungen AEG-Telefunken**, 1975, Bd. 65, H. 7, s. 266.
148. **Microwaves**, 1975, v. 14, № 3, p. 25; № 6, p. 75, 76; № 10, p. 76.
149. **Countermeasures**, 1977, № 3, p. 23.
150. **Int. Electr. Rundschau**, 1975, Bd. 29, H. 4, s. 65.
151. **Microwave J.**, 1975, v. 18, № 12, p. 45, 47, 59.
152. **Microwave J.**, 1976, v. 19, № 1, p. 49.
153. **Microwaves**, 1976, v. 16, № 11, p. 61.
154. **Electronic Warfare**, 1977, v. 9, № 4, p. 52.
155. **Microwave J.**, 1970, v. 13, № 4, p. 59.
156. **IEEE Trans.**, 1971, v. ED-18, № 2, p. 124; v. NS-18, № 3, p. 257.
157. **Int. Electr. Rundschau**, 1971, H. 2, s. 51.
158. **Microwaves**, 1971, v. 10, № 9, p. 57, 67.
159. **Electronics Let.**, 1971, v. 7, № 7, p. 153, 154.
160. **Microwave J.**, 1974, v. 17, № 11, p. 41, 49.
161. **IEEE Trans.**, 1972, v. ED-19, № 1, p. 111.
162. **Nachrichtentechnik**, 1972, Bd. 5, H. 1, s. 13, 15.
163. **Electronics Let.**, 1972, v. 8, № 5, p. 117, 118.
164. **Proc. IEEE**, 1973, v. 61, № 3, p. 299.
165. **Microwave J.**, 1973, v. 16, № 4, p. 16, 77; № 12, p. 33, 38.
166. **Microwave Syst. News**, 1973, v. 3, № 14, p. 4.
167. **Electronic Equipment News**, 1974, v. 16, № 1, p. 21.
168. **Microwaves**, 1974, v. 13, № 1, p. 26.
169. **J. of Microwave Power**, 1974, v. 9, № 3, p. 232.
170. **Microwave J.**, 1974, v. 17, № 11, p. 23, 26.
171. **Electron**, 1974, № 51, p. 44.
172. **Electronics and Power**, 1974, v. 20, № 5, p. 36.
173. **Electronic Eng.**, 1975, № 572, p. 5, 7.
174. **Electronic Design**, 1975, v. 23, № 25, p. 32, 34.
175. **Microwaves**, 1975, v. 14, № 10, p. 9, 10, 12.
176. **Microwave J.**, 1975, v. 18, № 12, p. 33, 37.
177. **NEC Research and Development**, 1976, № 41, p. 93.
178. **Communications International**, 1976, v. 3, № 8, p. 34, 36.
179. **Microwaves**, 1977, v. 16, № 1, p. 9, 10.

180. Западнoгерманская ЛБВ для вооруженных сил США. — Электроника, 1977, т. 50, № 2, с. 8, 9.
181. Microwave Power Sources. — Microwave J. 1975, v. 18, № 4, p. 18—28.
182. Electronics News, 1973, v. 18, № 938, p. 48.
183. Microwave J., 1974, v. 17, № 3, p. 39.
184. Microwaves, 1974, v. 13, № 10, p. 73.
185. Microwave J., 1975, v. 18, № 4, p. 18.
186. Microwave J., 1976, v. 19, № 11, p. 33.
187. Electronic Design, 1970, v. 18, № 6, p. 497.
188. Proc. IEEE, 1973, v. 61, № 3, p. 299, 300.
189. IEEE Trans., 1973, v. ED-20, № 4, p. 439.
190. STAR, 1973, v. 11, № 17, p. 2005.
191. Proc. IEEE, 1974, v. 62, № 8, p. 1149.
192. Бэйтс Д. Высококачественные ВЧ-усилители — комбинация электронной лампы и полупроводникового диода. — Электроника, 1974, т. 47, № 15, с. 25—30.
193. Microwave J., 1974, v. 17, № 2, p. 61.
194. Microwaves, 1975, v. 14, № 12, p. 66.
195. Диод новой структуры с выходной мощностью до 2 Вт. — Электроника, 1971, т. 44, № 17, с. 7.
196. Microwaves, 1971, v. 10, № 7, p. 12.
197. Electronic Design, 1971, v. 19, № 2, p. 31, 32, 35.
198. IEEE Trans., 1971, v. ED-18, № 10, p. 840.
199. Government Reports Announcements, 1972, v. 72, № 2, p. 73.
200. AEU, 1972, Bd. 26, H. 12, s. 558, 559.
201. IEEE Trans., 1973, v. ED-20, № 6, p. 517.
202. Electronics Let., 1973, v. 9, № 1, p. 11, 12; № 2, p. 36, 37.
203. Microwave J., 1974, v. 17, № 11, p. 41.
204. СВЧ-оборудование для спутников связи на выставке в Монре. — Электроника, 1974, т. 47, № 19, с. 3, 4.
205. IEEE Trans., 1974, v. ED-21, № 10, p. 652.
206. Electronic Design, 1975, v. 23, № 3, p. 34.
207. Бернсон Б. Современное состояние техники мощных полупроводниковых СВЧ-приборов. — Электроника, 1976, т. 49, № 2, с. 27—37.
208. Electronics Let. 1976, v. 12, № 6, p. 148.
209. Маттера Л. Последние достижения в области мощных полупроводниковых приборов. — Электроника, 1975, т. 48, № 13, с. 24—40.
210. IEEE Trans., 1976, v. MTT-24, № 11, p. 731.
211. Microwave J., 1977, v. 20, № 2, p. 22, 56; № 5, p. 26; № 7, p. 12, 37.
212. IEEE Trans., 1970, v. MTT-18, № 11, p. 885.
213. Microwaves, 1970, v. 9, № 4, p. 65.
214. Microwaves, 1971, v. 10, № 2, p. 42, 44, 46.
215. IEEE Trans., 1972, v. MTT-20, № 12, p. 799.
216. Microwave J., 1972, v. 15, № 2, p. 53.
217. IEEE Trans., 1973, v. MTT-18, № 7, p. 491, 492.
218. Microwaves, 1973, v. 12, № 1, p. 60; № 9, p. 72.
219. Microwave J., 1973, v. 16, № 8, p. 51.
220. Electronic Design, 1973, v. 21, № 18, p. 72.
221. Microwave J., 1974, v. 17, № 11, p. 26.
222. ИМПАТТ-диоды миллиметрового диапазона для накачки ППУ. — Электроника, 1974, т. 47, № 9, с. 3—5.
223. Microwaves, 1974, v. 13, № 8, p. 9, 10; № 12, p. 68.

224. *Proc. IEEE*, 1975, № 11, p. 1613, 1614.
225. *IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf.-Washington*, 1974, Session XY, p. 178.
226. *Microwaves*, 1975, v. 14, № 5, p. 79; № 6, p. 10; № 12, p. 10, 13.
227. *Electronics Let.*, 1975, v. 11, № 15, p. 345, 346; № 18, p. 430, 437, 438.
228. *IEEE Trans.*, 1975, v. MTT-23, № 6, p. 501.
229. *IEEE Trans.*, 1976, v. MTT-24, № 1, p. 31; № 3, p. 151.
230. *Microwave J.*, 1976, v. 19, № 10, p. 57; № 12, p. 20.
231. *Electronics Weekly*, 1976, № 817, p. 15.
232. *Microwaves*, 1976, v. 15, № 2, p. 28; № 5, p. 11; № 12, p. 52, 62.
233. *Microwaves*, 1977, v. 16, № 1, p. 50; № 7, p. 92.
234. *Electronics Let.*, 1970, v. 6, № 24, p. 775, 776.
235. *Microwaves*, 1972, v. 11, № 12, p. 9, 20, 21.
236. Бауэрс Х. Лавинно-пролетные диоды как усилители СВЧ. — *Электроника*, 1972, т. 45, № 18, с. 50—59.
237. *Microwaves*, 1973, v. 12, № 2, p. 14; № 7, p. 31.
238. *Solid-State Electronics*, 1973, v. 16, № 1, p. 75.
239. *Wescon Technical Paper*, 1973, v. 17, Session XY/1.
240. *Microwave J.*, 1973, v. 16, № 2, p. 27; № 3, p. 22, 23, 65.
241. Дэнси дэйрэ, 1975, т. 14, № 3, с. 103.
242. *Microwave J.*, 1974, v. 17, № 3, p. 15.
243. *IEEE Trans.*, 1974, v. ED-21, № 10, p. 624.
244. *Electronics Let.*, 1974, v. 10, № 16, p. 329.
245. *Rev. Electrical Commun. Lab.*, 1974, v. 22, № 5—6, p. 464.
246. *Electrical Communication*, 1974, v. 49, № 3, p. 276.
247. *Microwaves*, 1974, v. 13, № 5, p. 60, 62, 64.
248. *Microwave J.*, 1975, v. 18, № 1, p. 14, 16, 18; № 3, p. 20; № 4, p. 30.
249. *IEEE Trans.*, 1975, v. MTT-23, № 3, p. 282; № 6, p. 461.
250. *Microwave J.*, 1978, v. 21, № 2, p. 39.
251. *NEC Res. and Dev.*, 1975, № 36, p. 10.
252. *Electronic Eng.*, 1975, № 11, p. 5.
253. *Microwaves*, 1976, v. 15, № 1, p. 67; № 6, p. 15; № 12, p. 23, 58.
254. *Microwave J.*, 1976, v. 19, № 1, p. 34, 35; № 3, p. 36; № 8, p. 26, 27.
255. Реализация почти всего ВЧ-приемника на одной кремниевой БИС. — *Электроника*, 1978, т. 51, № 16, с. 3.
256. *Microwaves*, 1977, v. 16, № 9, p. 9, 10.
257. Нихон Дэнки гихо, 1977, № 121, с. 71.
258. *Microwave J.*, 1973, v. 16, № 5, p. 23, 27.
259. *Microwave J.*, 1975, v. 18, № 9, p. 24.
260. *Microwaves*, 1976, v. 15, № 7, p. 14, 17; № 12, p. 12, 17.
261. *Electronic News*, 1976, v. 49, № 1065, p. 38.
262. *Comments Plasma Phys. Cont. Fusion*, 1977, v. 3, № 3, p. 87.
263. *Military Electronics/Countermeasures*, 1977, № 3, p. 32, 33.
264. *Components Rept.*, 1977, v. 12, № 4, p. 127, 128.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Амплитрон 9, 55—57, 61
- Биматрон 9, 55
- Гибридные интегральные СВЧ
схемы 12
- СВЧ приборы 146
 - защитные 152
 - — полупроводниковые 159
 - — ферритовые 159
 - твистроны 147
 - электронно-полупроводниковые 148
 - — основные параметры 149—151
- Гиротрон 247
- Демагрон 9, 55
- Детекторные диоды 153, 156
- рабочий диапазон частот 156
 - устойчивость к перегрузкам 157
 - чувствительность 157
- Диоды Ганна 153—155, 175—177
- выходная мощность 178—179
 - рабочий диапазон частот 177
 - шумы 180
 - срок службы 182
- Карпитрон 53—54
- Клистрон 8, 102, 251
- отражательный 105, 132, 230
 - — выходная мощность 133
 - — кругизна электронной перестройки 134
 - — основные параметры 136
 - — пролетный 102
 - — генераторный 127
 - — — двухрезонаторные 127
 - — — основные параметры 128—131
 - — — применение 128
 - — — с распределенным взаимодействием 127—130
 - — — основные параметры 129—132
 - — усилительный 104, 107
 - — — импульсный режим 107—113
 - — — непрерывный режим 114—116, 123, 125—127
 - — — фокусирующая система 121
- Коакситрон 25
- Комплексированные усилительные устройства 24—26
- Лавинно-пролетный диод 154—155, 169—170
- выходная мощность 171
 - коэффициент усиления 173
 - шума 174
 - рабочий диапазон частот 170
 - срок службы 175
- Лампа бегущей волны 8, 13, 64—67, 248, 250
- бортовая 84
 - — выходная мощность 84—85
 - КПД 87—88
 - — масса 88
 - — рабочий диапазон частот 84
 - — срок службы 88—89
 - двухрежимная 80, 250
 - — основные параметры 82, 83
 - малошумящая и маломощная 97
 - — основные параметры 73—75
 - миниатюрная 90, 94
 - — основные параметры 92
 - мощная импульсная 65, 67—68
 - — выходная мощность 68
 - — конструкция замедляющей системы 71
 - — коэффициент усиления 69
 - — применение 67, 73
 - — рабочий диапазон частот 68
 - — срок службы 73
 - мощная непрерывная 76

- — выходная мощность 77, 79
- — коэффициент усиления 79
- — КПД 79
- — применение 78
- — рабочий диапазон частот 77
- — срок службы 80
- печатная 94—97
- Лампа обратной волны М-типа 8, 27, 51, 250
- выходная мощность 52, 53
- КПД 52
- применение 52
- рабочий диапазон частот 52
- срок службы 53
- устройство 51
- Лампа обратной волны О-типа 138, 253
- выходная мощность 139
- основные параметры 140, 141
- применение 139
- рабочий диапазон частот 139
- срок службы 145
- устройство 138
- шумы 143
- Магнетрон 9, 29
- коаксиальный 9, 26, 28, 35—40, 249—250
- коаксиально-обращенный 9, 26, 36
- непрерывного режима 41—45
- основные параметры 42—45
- обычной конструкции 27—28, 250
- — маломощные импульсные 32—34
- мощные импульсные 29—31
- Мазер на циклотронном резонансе 8, 155
- Минитрон 137
- Митрон 46
- основные параметры 47—51
- Модуль малошумящего усилителя на ЛБВ 100—101
- Пассивные СВЧ устройства 11, 13

- Плазменные, газоразрядные СВЧ приборы 8, 12
- Полевые тетроды 155, 189—191, 248
- Приборы магнетронного типа 8, 13, 26, 27, 105, 113
- Резнатрон 25
- Смесительные диоды 160—163
- Твердотельные генераторы 191—198
- на диодах Ганна 203—205, 230, 252
- на лавинно-пролетных диодах 192—198, 230, 252
- на транзисторах 208—212, 252
- Твердотельные усилители 213
- на диодах Ганна 214, 224, 228, 253
- на лавинно-пролетных диодах 214—215, 220, 221—223, 253
- параметрические 214, 216, 229, 253
- — многокаскадные 233—234, 236
- — однокаскадные 230, 234
- — охлаждаемый 230—232, 248
- транзисторах 215, 237—238, 248, 253
- туннельных диодах 217—219, 233, 248, 253
- Термоэлектрический охладитель 233
- Тетроды электровакуумные 8, 15, 22—24, 250
- Транзисторы 153
- биполярные 154—155, 182—183
- полевые 155, 186—189
- Триоды металлокерамические 8, 16—18, 250
- Туннельные диоды 155, 164—168
- Усилители магнетронного типа 52, 62, 250
- Электровакуумные приборы с электростатическим управлением 8, 15

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Основные обозначения	5
Введение	7

Часть 1

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Глава 1

ПРИБОРЫ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

	15
1.1. Триоды	16
1.2. Тетроды	22
1.3. Модули на триодах и тетродах	24

Глава 2

ПРИБОРЫ МАГНЕТРОННОГО ТИПА

	26
2.1. Импульсные магнетроны обычной конструкции	29
2.2. Коаксиальные магнетроны	35
2.3. Магнетроны непрерывного режима	41
2.4. Митроны	46
2.5. ЛОВ М-типа	51
2.6. Усилители магнетронного типа	54

Глава 3

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

	64
3.1. Импульсные ЛБВ	67
3.2. Мощные ЛБВ непрерывного режима	76
3.3. Двухрежимные ЛБВ	80
3.4. ЛБВ для космических аппаратов	84
3.5. Мини-ЛБВ	90
3.6. ЛБВ на печатных платах	94
3.7. Малошумящие и маломощные ЛБВ	97
3.8. Модули на ЛБВ	100

Глава 4

КЛИСТРОНЫ

	102
4.1. Импульсные усилительные клистроны	107
4.2. Усилительные клистроны непрерывного режима	114
4.3. Генераторные клистроны	127
4.4. Отражательные клистроны	132

Глава 5

ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ О-ТИПА

138

Глава 6

ГИБРИДНЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

146

6.1. Твистроны	147
6.2. Электронно-полупроводниковые приборы	148
6.3. Гибридные защитные устройства	152

Часть 2

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Глава 7

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВЧ ДИОДЫ И ТРАНЗИСТОРЫ	155
7.1. Детекторные диоды	158
7.2. Смесительные диоды	160
7.3. Туннельные диоды	164
7.4. Лавинно-пролетные диоды	169
7.5. Диоды Ганна	175
7.6. СВЧ транзисторы	182
7.7. Полевые СВЧ тетроды	189

Глава 8

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ ГЕНЕРАТОРЫ	191
8.1. Генераторы на ЛПД	195
8.2. Генераторы на диодах Ганна	203
8.3. Генераторы на транзисторах	208

Глава 9

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ УСИЛИТЕЛИ	213
9.1. Усилители на туннельных диодах	217
9.2. Усилители на ЛПД	220
9.3. Усилители на диодах Ганна	224
9.4. Параметрические усилители	229
9.5. Усилители на транзисторах	237
Заключение	246
Список литературы	260
Предметный указатель	268

Сергей Владимирович Кукарин

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВЧ ПРИБОРЫ
ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРИМЕНЕНИЕ, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Редактор *В. М. Ларионова*
Художественный редактор *Н. А. Игнатьев*
Переплет художника *Л. Г. Прохорова*
Технический редактор *З. Н. Ратникова*
Корректор *О. И. Галанова*

ИБ № 409

Сдано в набор 05.06.80 Подписано в печать 06.02.81 Т-00741
Формат 84×108^{1/32} Бумага тип. № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 14,28 Уч.-изд. л. 15,305
Тираж 8000 экз. Изд. № 19542 Зак. № 672 Цена 1 р. 20 к.

Издательство «Радио и связь», Москва, Главпочтамт, а/я 693

Московская типография № 10 «Союзполиграфпрома»
Государственного Комитета СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10