

## Усилительные приборы О-типа миллиметрового диапазона

А. В. Ляшенко, В. П. Ерёмин  
ОАО "Тантал", г. Саратов, Россия  
E-mail: solopov@tantal-2.renet.ru

А. И. Тореев

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

*Проведен аналитический обзор разработок усилительных приборов О-типа миллиметрового диапазона, выполненных ведущими зарубежными фирмами и научными лабораториями. Рассмотрены тенденции развития таких приборов при продвижении в коротковолновую часть миллиметрового диапазона.*

PACS: 41.20.-q

### Введение

Работа связана с проблемой освоения и использования миллиметрового диапазона длин волн.

В значительной мере решение этой проблемы сильно сдерживается отсутствием эффективных источников излучения как по причинам технического и технологического плана, так и по причинам недостаточно исследованных физических явлений, лежащих в основе функционирования этих источников и непосредственно связанных с резким уменьшением всех геометрических размеров из-за малой длины волны. Все эти трудности в полной мере относятся к таким широко распространенным приборам как лампы бегущей волны (ЛБВ), лампы обратной волны (ЛОВ), клистроны, клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ). Трудности, связанные с уменьшением длины волны, особенно рельефно проявляются с уменьшением поперечных размеров (например, диаметра пролетного канала) электродинамической системы, которое неизбежно приводит к сложностям формирования и транспортировки узких (десятые доли миллиметра) электронных пучков очень высокой удельной мощности (единицы-десятки МВт/см<sup>2</sup>). При этом требование обеспечения достаточно высокого токопрохождения (более 99 %) осложняется ограниченными возможностями пакетированных магнитов, особенно таких как магнитные периодические фокусирующие системы (МПФС), в реализации достаточно высоких величин индукции фокусирующего магнитного поля. Это вынуждает разработчиков снижать величину тока пучка и увеличивать ускоряющее напряжение, т. е. уменьшать первеанс пучка. Как следствие, уменьшается параметр усиления Пирса, электронный коэффициент полезного действия (КПД), ухудшаются полосовые характеристики прибора.

Более того, по мере укорочения длины волны в электронных пучках нарастает возмущающее воздействие начальных поперечных тепловых скоростей электронов на структуру пучков, приводящее к пульсациям пучка, значительному его расплыванию в пролетном канале и возрастанию токооседания на электродинамической системе.

В данном обзоре проведено рассмотрение результатов разработок приборов типа О, выполненных ведущими фирмами США, Франции, Германии, Канады, Англии, Японии, и в первую очередь спиральных ЛБВ, которые имеют одно главное преимущество перед другими приборами — широкополосность. Это их уникальное свойство сохраняется и при переходе из сантиметрового диапазона в миллиметровый. Такое преимущество заставляет мириться с одним из слабых свойств спиральных ЛБВ — трудностью обеспечения достаточно хорошего теплового рассеяния, связанного с тем, что температурный перегрев замедляющих систем (ЗС) за счет токооседания усугубляется нарастанием тепловой нагрузки из-за возрастания распределенных потерь в спирали с увеличением частоты.

Рассмотрение разработок спиральных ЛБВ проведено в интервале частот 25—60 ГГц и уровней выходной мощности 10—1000 Вт и более.

В то же время при попытках продвижения в более высокие частоты и большие уровни выходной мощности проявились ограниченные возможности спиральных ЛБВ миллиметрового диапазона.

В целях преодоления энергетического барьера разными разработчиками были предложены такие различные модификации электродинамических систем с высокой механической и, главное, теплорассеивающей способностью, как, например, цепочки связанных резонаторов (ЦСР-типа диафрагмированного волновода), гребенка, двойная гребенка, петляющий волновод, лестничная система и др.

Обзор разработок приборов с такими системами целесообразно было провести также в широком интервале частот (30—100 ГГц). Такой подход позволяет выявить тенденции изменения влияния различных электрических, механических, тепловых и других свойств электродинамических и электронно-оптических систем на выходные характеристики и параметры приборов. Кроме того, приборы более длинноволнового участка (30—60 ГГц) могут служить основой схемного решения задачи по достижению в коротковолновом участке миллиметрового диапазона (90—100 ГГц) требуемых уровней мощности и других выходных параметров.

При проведении обзора был выбран структурный принцип рассмотрения, при котором для каждого типа электродинамической системы прибора, например в ЛБВ, или для выбранного типа прибора (ЛБВ, КРВ), можно выявить наиболее эффективные как в отношении выходных и эксплуатационных параметров, так и в плане конструктивно-технологических возможностей их реализации при продвижении в более коротковолновый участок миллиметрового диапазона.

### ЛБВ со спиральной замедляющей системой

Среди первых разработанных спиральных ЛБВ можно отметить ЛБВ типа WJ-3638 фирмы Watkins-Johnson (США) [1, 2] и ЛБВ N 10043 фирмы EEV (Англия) [3, 4].

В ЛБВ WJ-3638, работающей в диапазоне 35—40 ГГц, выходная мощность составляла более 10 Вт в непрерывном режиме. Магнитно-периодическая фокусирующая система с амплитудой поля 0,24 Тл и с периодом 7 мм обеспечивала токопрохождение на уровне 95 % электронного пучка с ускоряющим напряжением 9 кВ и током 24 мА через пролетный канал диаметром 0,67 мм. Рабочая полоса ограничивалась 14%-ным волноводным окном баночного типа. Весьма малые значения (4—5 %) электронного КПД и коэффициента усиления 24 дБ (в режиме насыщения) обусловлены как большими распределенными потерями вольфрамовой спирали диаметром проволоки 0,1 мм, так и малой величиной сопротивления связи

из-за большой диэлектрической нагрузки, вносимой четырьмя крепежными стержнями из окиси бериллия диаметром 0,8 мм. Формирование электронного пучка обеспечивалось компрессионной электронной пушкой с компрессией 77. Катод импрегнированный, диаметром 1,37 мм и плотностью тока эмиссии 1,6 А/см<sup>2</sup> со сроком службы более 100 000 ч. Технический КПД прибора 20 % обеспечивался за счет рекуперации.

В ЛБВ N10043, в которой спираль крепится на трех диэлектрических стержнях (аналогично Watkins-Johnson), по традиционной с сантиметровым диапазоном технологии были получены более высокие величины коэффициента усиления и выходной мощности (40 дБ и 20 Вт, соответственно) в диапазоне частот 27,5—39 ГГц за счет существенного увеличения тока пучка до 55 мА при тех же значениях ускоряющего напряжения 9—10 кВ.

Хорошие результаты по выходной мощности, усилению, полосе частот были достигнуты фирмами Hughes (40 Вт, 45 дБ в полосе 35—40 ГГц), Varian (40 Вт, 40 дБ в полосе 31—37 ГГц), Raytheon (10 Вт, 35 дБ в полосе 32—37 ГГц) и др. [4].

Следует отметить, что при конструировании спиральных ЛБВ одним из трудных вопросов является обеспечение достаточно удовлетворительного теплоотвода от спиральной ЗС к вакуумной оболочке и хорошей теплопередачи от вакуумной оболочки к системе охлаждения [4, 5].

Существенное снижение распределенных потерь в спиральных ЗС было достигнуто фирмой Thomson-CSF (Франция) с помощью разработанной технологии паяного высокочастотного (ВЧ) пакета с медной спиралью [2, 6]. Этой фирмой с 1985 г. выпускается спиральная ЛБВ мощностью 100 Вт (в непрерывном режиме) в диапазоне 27,5—30 ГГц [7], а в 1988 г. разработана подобная ЛБВ с уровнем непрерывной выходной мощности до 200 Вт [8]. В качестве ЗС в этой ЛБВ использовалась медная спираль с внутренним диаметром 0,7 мм, припаянная к трем опорным стержням из окиси бериллия, которые в свою очередь припаяны изнутри к медной вакуумной оболочке. Оболочка лампы припаяна к полюсным наконечникам магнитной системы и образует вместе с ними единую интегрированную конструкцию, обеспечивающую хороший теплоотвод от спирали (рис. 1) [8]. Замедляющая система выполнена трехсекционной, что обеспечивает общий коэффициент усиления 55 дБ (в режиме малого сигнала). Секции разделяются встроеными

поглотителями из осажденного углерода. В каждой секции шаг спирали изменяется по определенному закону для предотвращения возникновения паразитных колебаний на обратной волне.

Параметры пучка:  $U_0 = 13$  кВ,  $I_0 = 150$  мА,  $P_\mu = 0,1$ . КПД прибора составляет 11 %, а за счет рекуперации ( $U_{ring} = 5$  кВ) достигает ~25 %.

Матричный катод, покрытый осмием, при величине плотности токоотбора  $4$  А/см<sup>2</sup> обеспечивает срок службы прибора до 50 тыс. ч. Управление пучком производится по фокусирующему электроду ( $U_f = -30$  В;  $-1000$  В). Для защиты катода от ионной бомбардировки на анод относительно ЗС подается смещение 150 В. В приборе фокусировка и транспортировка пучка обеспечиваются МПФС с магнитным полем 0,35 Тл (самарий-кобальтовые кольцевые магниты 12×6 мм). Вывод энергии выполнен в виде ВЧ-перехода (рис. 2) от спирали к выходному волноводу. В этой конструкции осуществляется непосредственное присоединение спирали к теплоотсеивающей массе за счет пайки последнего витка спирали к короткой полосковой линии, выполненной в П-образном волновом, переходящим посредством ступенчатого трансформатора сопротивлений чебышевского типа на прямоугольный волновод WR34. На рис. 3 представлены результаты экспериментальных измерений прибора. Как видно из этого рисунка, выходная мощность во всем диапазоне частот более 180 Вт. Коэффициент усиления в режиме малого сигнала 55 дБ. Предполагается, что можно увеличить выходную мощность до 200 Вт путем оптимизации шага ЗС [8].

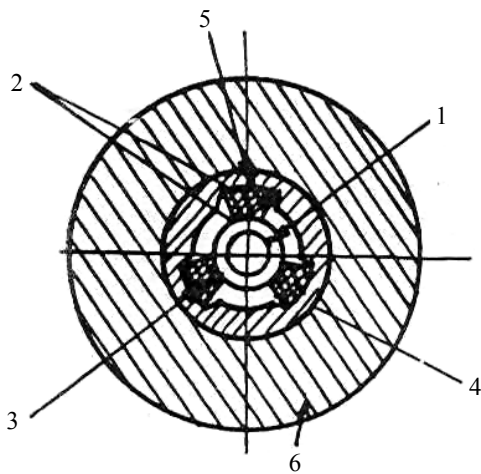


Рис. 1. Поперечное сечение ЛБВ:

1 — медная спираль; 2, 4 — пайка; 3 — стержень из В<sub>2</sub>О;  
5 — вакуумная оболочка; 6 — полусной наконечник

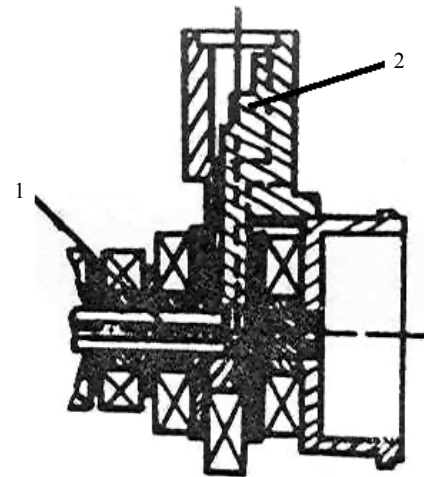


Рис. 2. ВЧ-переход от спирали к выходному волноводу:  
1 — паяная спираль; 2 — трансформатор сопротивлений

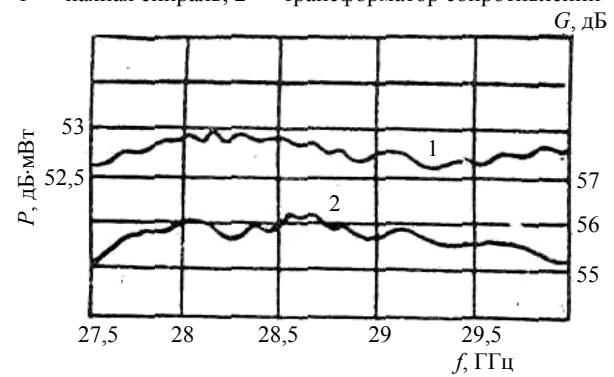


Рис. 3. Зависимости от частоты:

1 — выходной мощности в режиме насыщения;  
2 — коэффициента усиления ЛБВ в режиме малого сигнала

По другому пути по наращиванию выходной мощности пошли японские разработчики. Так, в системе спутниковой связи DYNET [9] для обеспечения выходной мощности 150 Вт в диапазоне 27,5—28,5 ГГц в схему передатчика были установлены две ЛБВ непрерывного действия с выходной мощностью 100 Вт каждая.

Фирма  $\lambda/4$  Quarterwave Corporation (США) разработала передающий модуль 9321/95300-K27K30 на основе ЛБВ непрерывного действия с выходной мощностью 200 Вт в диапазоне 27,5—30 ГГц и усилением 30 дБ.

Коэффициент стоячей волны (КСВ) нагрузки составлял 1,2—1,0. Масса всей установки (с источником питания и схемой управления) равна  $\approx 50$  кг, охлаждение воздушное.

Эта же фирма разработала систему 9100/95020 K33K36 на основе импульсной ЛБВ с выходной мощностью  $P_{out} = 100$  Вт (коэффициент заполнения  $K = 20$  %) в полосе частот 33—36 ГГц с усилением 40 дБ. Длительность импульса — 0,08—5,0 мкс [10].

Существенное увеличение выходной мощности достигнуто в спиральных ЛБВ типа 8926Н и 8909Н (L-3 Com. El. Dev., США) [11]. В первом приборе при ускоряющем напряжении 14,5 кВ и токе пучка 108 мА обеспечивается непрерывная выходная мощность 350—380 Вт и КПД до 50 % (с трехступенчатым коллектором) в диапазоне частот 27,5—30,0 ГГц. На нижнем краю частотной полосы выходная мощность в режиме насыщения составляет 400 Вт при напряжении и токе пучка 14,7 кВ и 111 мА, соответственно.

Прибор устойчиво работает даже при температуре 100 °С опорной плиты. В приборе 8909Н обеспечивается импульсная выходная мощность 1 кВт (при заполнении 10 %) в полосе 33,4—36,0 ГГц при ускоряющем напряжении 18,8 кВ и токе пучка 350 мА. О дальнейшем увеличении уровня выходной мощности спиральной ЛБВ до 500 Вт (прибор 8926НВ) в непрерывном режиме сообщено на конференции IVES 2008 [12].

В связи с развитием спутниковой связи в последние годы активно осваивается диапазон 43,5—45,5 ГГц. Ввиду большой мгновенной полосы спиральных ЛБВ они являются идеальными приборами для использования в выходных и предвыходных каскадах передатчиков этого диапазона. Ведущими в разработке таких ламп являются фирмы Hughes, Raytheon (США), Varian (США, Канада), AEG (Германия), Thomson (Франция), NEC (Япония).

Одной из первых была разработанная фирмой Varian 25-ваттная ЛБВ непрерывного действия с МПФС [13]. Для изготовления лампы была использована традиционная технология: вольфрамовая спираль, скрепленная тремя стержнями из анизотропного нитрида бора BN. Блок вставляется в оболочку, объединенную с магнитопроводом методом холодной сборки (методом натяга) с применением специальной оснастки. При сборке для обеспечения постоянного натяга по всей длине пакета необходимо было выполнение размеров для пакета и оболочки с точностью  $\pm 1,25$  мкм. Внутренний диаметр спирали равнялся 0,556 мм, а размеры поперечного сечения керамических стержней — 0,375×0,5 мм. Фокусировка обеспечивалась самарий-кобальтовыми магнитами с внешним диаметром 12,7 мм, с помощью которых во входной части прибора обеспечивалось поле амплитудой 0,32 и 0,42 Тл в выходной части ЛБВ.

Нейтрализация влияния поперечных полей осуществлена за счет увеличенного внутреннего диаметра магнитных колец по сравнению с

внешним диаметром втулок полюсных наконечников.

В волноводном окне вывода энергии использовалась бериллиевая таблетка диаметром 3 мм и толщиной 1,346 мм. Для согласования спиральной системы с волноводным выводом применялись

Н-образные переходы. Во всей полосе пропускания волновода WR22 обеспечивался коэффициент стоячей волны нагрузки (КСВН) менее 2.

В ЛБВ применена электронная пушка с высокой сходимостью и малым первеансом. Ускоряющее напряжение 10,2—10,5 кВ, ток пучка 52—57 мА и ток на ЗС ~0,5—0,7 мА. Запирание пучка и оптимальное токопрохождение 99,7 % обеспечивались фокусирующим электродом ( $U_f = -400$  В;  $-9$  В). В приборе достигаются достаточно широкая рабочая полоса частот (42,5—44,5 ГГц) с достаточно малым перепадом уровня выходной мощности и высокий уровень усиления ~30 дБ.

Аналогичные результаты получены японской фирмой NEC при разработке спиральной ЛБВ с выходной мощностью не менее 24 Вт на частотах 43—45 ГГц, предназначенной для бортового передатчика спутниковой системы связи [14].

Напряжение на ЗС выбрано равным 10,1 кВ, параметр  $\gamma_a = 1,6$ . Спираль выполнена из вольфрамовой ленты, выходная ее часть покрыта золотом для снижения ВЧ-потерь. Внутренний диаметр спирали равен 0,57 мм. Опорные стержни ВЧ-па-

кета сечением 0,25×0,5 мм выполнены из анизотропного пиролитического нитрида бора. Вакуумная оболочка образована полюсными наконечниками, спаянными с кольцевыми прокладками. После пайки оболочка протачивается до диаметра, несколько меньшего, чем диаметр ВЧ-пакета, который вставляется и закрепляется в ней методом термообжатия. Точность изготовления деталей и сборки до 5 мкм. Общий вид оболочки показан на рис. 4.

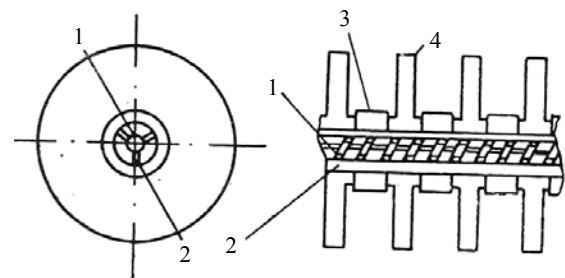


Рис. 4. Структура с интегрированными полюсными наконечниками:

- 1 — спираль; 2 — опорные стержни; 3 — прокладка;  
4 — полюсный наконечник

Магнитное поле с амплитудой 0,42 Тл обеспечивается МПФС. Электронная пушка Пирса с компрессией 35 обеспечивает ток пучка 52 мА (микроперванс пучка  $p_{\mu} = 0,112$ ) при плотности токоотбора с катода 2,3 А/см<sup>2</sup> (диаметр диспенсерного катода равен 1,68 мм). Для повышения КПД в ЛБВ применен трехступенчатый коллектор с пониженными напряжениями на ступенях. В экспериментальном макете ЛБВ при электрических параметрах:  $U_0 = 10,15$  кВ,  $I_0 = 52$  мА,  $I_c = 0,35$  мА (при  $U_f = -15$  В относительно катода),  $U_1 = 3,2$  кВ,  $I_1 = 5,6$  мА;  $U_2 = 2,1$  кВ,  $I_2 = 25,2$  мА;  $U_3 = 1,37$  кВ,  $I_3 = 20,9$  мА на частоте 44 ГГц обеспечивалась выходная мощность 29,3 Вт при электронном КПД 5,6 %, общем КПД 27,3 % и коэффициенте усиления 43,5 дБ. Общая длина прибора 334 мм, масса его 1 кг.

Значительно больший уровень выходной мощности в диапазоне 43—45 ГГц был получен в ЛБВ TH3760 [15] французской фирмой Thomson-CSF. Для уменьшения разброса скоростей электронов в динамическом режиме в лампе был выбран низкий перванс, что снизило КПД прибора примерно до 7 %, но за счет использования коллектора с пониженным потенциалом общий КПД составил 25 %. Электрические параметры электронно-оптической системы были выбраны такими:  $U_0 = 13$  кВ,  $I_0 = 100$  мА,  $I_c = 1$  мА, напряжение на фокусирующей электроде  $U_f = -900; -6$  В, напряжение на аноде относительно ЗС 150 В, напряжение на коллекторе 3,5 кВ.

Электронная пушка формировала на входе в спиральную ЗС электронный пучок диаметром 0,2 мм. Транспортировка пучка с высоким уровнем токопрохождения 99 % обеспечивалась МПФС в виде колец из сплава самарий-кобальт, легированного для обеспечения стабильности в широком интервале температур.

Чтобы пучок был более стабильным, его сходимость была ограничена выбором диаметра катода в 1,75 мм (плотность токоотбора 4 А/см<sup>2</sup>). Для определения параметров ЗС использовалось компьютерное моделирование с предварительными измерениями согласования, потерь, дисперсии, тепловыми измерениями и подбором допусков, при которых обеспечивалась хорошая воспроизводимость прохождения пучка в канале.

Серьезной проблемой явилось подавление паразитной генерации на обратной волне и на колебаниях  $\pi$ -вида. Это удалось достичь путем использования спирали с переменным шагом. Трудной задачей оказалась разработка окна вывода энергии на 45 ГГц с малыми размерами и

широкой полосой пропускания, представляющего собой диск, впаянный в металлическую рамку. Удалось получить КСВН, равный 1,2 во всей полосе частот. Медный коллектор изолирован от корпуса прибора с помощью алюмооксидных керамических стержней. Для уменьшения теплового сопротивления сборка конструкции лампы осуществлялась методом сжатия. Основные высокочастотные характеристики представлены на рис. 5, а, б.

Экспериментальные измерения показали следующее: выходная ВЧ-мощность в непрерывном режиме более 90 Вт во всей рабочей полосе (43,5—45,5 ГГц) с перепадом не более 0,5 дБ; коэффициент усиления в полосе более 54 дБ. Существенное увеличение выходной мощности было достигнуто фирмой L-3 Comm. El. Tech. (США) в спиральной ЛБВ типа 8925H [12]. В приборе обеспечивалась выходная непрерывная мощность более 200 Вт в полосе частот 43,5—45,5 ГГц, усиление более 42 дБ (–1,5 дБ). КПД прибора с трехступенчатым коллектором составил ~49 %.

В последнее время ряд фирм успешно разрабатывают модули с использованием спиральных ЛБВ. Такой модуль включает в себя, кроме основного элемента, ЛБВ, системы управления, контроля, защиты, охлаждения и т. д. Например, в лаборатории L-3 Comm. Corp. (США) с использованием ЛБВ, работающей при напряжении 7,7 кВ и токе 110 мА, разрабатывается модуль MPMs с выходной мощностью 60 Вт в частотной полосе 43—46 ГГц и усилением 45 дБ (в средней части полосы в режиме малого сигнала). Размеры всего комплекса 215×195×31,75 мм [16].

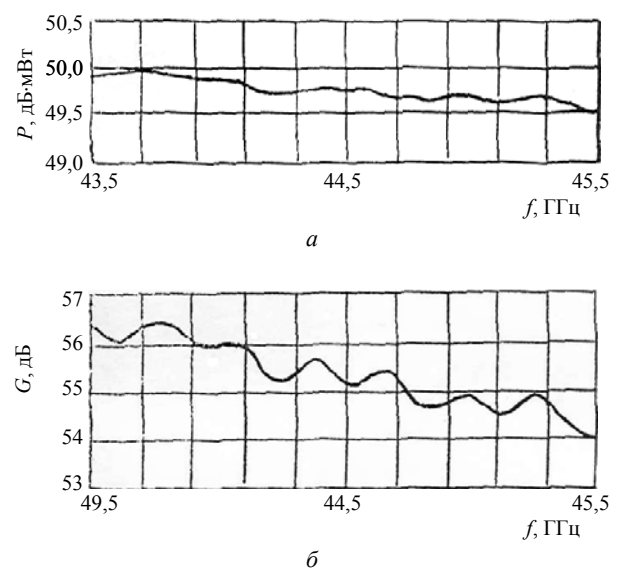


Рис. 5. Зависимости от частоты:

а — выходной мощности; б — коэффициента усиления

### Модификации мощных ЛБВ миллиметрового диапазона

Из приведенного рассмотрения видно, что спиральные ЛБВ имеют определенные ограничения как по достижению высоких уровней выходной ВЧ-мощности, так и более высоких частот. Различными фирмами за последние годы проводились и проводятся исследования по повышению выходной мощности ЛБВ миллиметрового диапазона на основе использования замедляющих систем, обладающих значительно большими теплорассеивающими способностями, таких как традиционные цепочки связанных резонаторов (ЦСР), гребенки, петляющий волновод, лестничные системы.

#### ЛБВ с ЗС типа ЦСР

Значительное развитие получили приборы, использующие ЗС типа ЦСР, благодаря большой механической прочности и термостойкости, а также высокой величине сопротивления связи ЗС. Среди зарубежных фирм, наиболее активно работающих в этом направлении, следует отметить фирмы Hughes, Varian (CPI), Raytheon (США, Канада); Siemens (Германия).

Одними из первых ЛБВ миллиметрового диапазона фирмы Hughes были ЛБВ типа 914Н и 913Н, в которых при ускоряющем напряжении 16 кВ и токе пучка 70 мА в непрерывном режиме обеспечивалась выходная мощность 200 Вт, усиление 35 дБ в полосе частот 30—31 ГГц (914Н) и 100 Вт, усиление 45 дБ в полосе 36—38 ГГц (913Н). Масса приборов, пакетированных с МПФС, составляла 5,45 кг [17, 18].

Высокий уровень импульсной выходной мощности получен в ЛБВ фирмы Raytheon. Так, в приборе QKW1995 [19], пакетированном с МПФС массой 2,5 кг, обеспечивается импульсная выходная мощность 1 кВт (коэффициент заполнения  $K = 0,1\%$ ) и усиление 37,5 дБ в полосе частот 36—38 ГГц при рабочем напряжении 25 кВ и токе пучка 400 мА.

Среди мощных ЛБВ следует также отметить разработанную фирмой Siemens ЛБВ типа RW-3010 [20] на ЦСР с непрерывной выходной мощностью 1 кВт в полосе частот 36,7—38,2 ГГц при усилении 43 дБ в режиме максимального КПД и 50 дБ — в линейном режиме.

Электронный КПД прибора составляет 11—14 %, технический КПД — 30 %. Отметим в этом приборе высокое токопрохождение через пролетный канал диаметром 1 мм электронного пучка напряжением 25 кВ и током 400 мА при фокусировке МПФС с массой 4,8—5,6 кг. В

работе [21] приведены результаты расчета и сопоставления с экспериментом ЛБВ VTA-6430A2 с ЗС типа ЦСР в диапазоне 29—30 ГГц с выходной мощностью 500 Вт и в частотной полосе 30—31 ГГц с выходной мощностью 450 Вт.

В диапазоне 40—60 ГГц наибольшее число разработок выполнено фирмой Hughes. Среди них следует отметить ЛБВ типа 920Н с выходной мощностью в непрерывном режиме 50 Вт, усилением 35 дБ в диапазоне 59,7—60,3 ГГц при ускоряющем напряжении 15,5 кВ и токе пучка 60 мА. Масса прибора с МПФС — 5,91 кг [17].

Для систем связи космос—космос разработана компактная ЛБВ типа 960НА (масса 3,63 кг, габаритные размеры 36,3×8,9×9,1 см), которая обеспечивает в диапазоне 60—60,7 ГГц непрерывную выходную мощность 10 Вт и очень высокий коэффициент усиления 50 дБ (в насыщении) при анодном напряжении 13,4 кВ и токе пучка 17 мА [22].

Значительно больший уровень непрерывной выходной мощности 250 Вт получен в ЛБВ типа 941НА в диапазоне 43,5—45,5 ГГц при усилении 50 дБ (насыщение). Прибор работает при ускоряющем напряжении 22,5 кВ и токе пучка 100 мА. Масса прибора, пакетированного с МПФС, составляет 7,3 кг. Габаритные размеры:  $\varnothing 10,2 \times 45,7$  см. Охлаждение жидкостно-воздушное [17].

Аналогичные результаты получены фирмой Varian [23] в приборе с ЗС типа ЦСР: диапазон 43,5—45,5 ГГц, выходная мощность 250 Вт (в режиме насыщения), коэффициент усиления 50 дБ (насыщение), ускоряющее напряжение 22 кВ, ток 150 мА, МПФС, масса 6,8 кг, рекуперация при  $U_{ring} = 8$  кВ, охлаждение жидкостное. Общая длина прибора 61 см.

Уровень непрерывной выходной мощности порядка 1 кВт и более был достигнут на ЦСР фирмой Hughes в ЛБВ типа 813Н и 819Н [2, 17].

В ЛБВ типа 813Н обеспечивается непрерывная выходная мощность 1 кВт на частоте 55 ГГц, коэффициент усиления 20 дБ в полосе 1 ГГц при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе пучка 400 мА. В приборе электронный пучок взаимодействует с одной пространственной гармоникой ЗС. Токопрохождение пучка через пролетный канал диаметром 0,84 мм составляет более 98 %. Согласование цилиндрических резонаторов с нагрузочным прямоугольным стандартным волноводом (сближение величин волновых сопротивлений) осуществляется путем плавного уменьшения размера узкой стенки волновода. В волноводном окне вывода энергии применяется керамический диск. В качестве локального ВЧ-поглотителя

используются внешние согласованные охлаждаемые нагрузки. Общий КПД (25 %) достигается за счет понижения потенциала на коллекторе до 9 кВ. В ЛБВ типа 819Н в этом же диапазоне частот при ускоряющем напряжении 45 кВ и токе пучка 900 мА выходная мощность достигает 5 кВт, технический КПД равен 33 % (при потенциале коллектора 16 кВ). Усиление в линейном режиме 20 дБ, а в режиме насыщения — 17 дБ.

Одной из первых разработанных ЛБВ коротковолновой части миллиметрового диапазона была ЛБВ типа 814Н [2, 19], имевшая в полосе частот 91—96 ГГц выходную непрерывную мощность 100—150 Вт при электронном КПД 4—5 % и техническом КПД 20 %. Выходные характеристики были далеки от оптимальных: электронный КПД менее 5 %, усиление всего 15 дБ, замедляющая система с внутренним диаметром 0,38 мм и длиной всего 19 мм. Достаточно высокое токопрохождение электронного пучка с ускоряющим напряжением 25 кВ и током 170 мА обеспечивалось за счет фокусировки тяжелым постоянным магнитом массой 14,8 кг с уровнем магнитного поля 0,55 Тл.

В разработанной этой же фирмой ЛБВ типа 982Н [2, 17] были достигнуты отличные как выходные, так и эксплуатационные характеристики. В полосе частот 93—95 ГГц в квазинепрерывном режиме ( $K = 50\%$ ) ЛБВ имела выходную импульсную мощность 100 Вт (средняя мощность 50 Вт) и усиление 50—44 дБ. Фокусировка электронного пучка напряжением 22 кВ и током 88 мА обеспечивалась магнитной системой МПФС массой 5,45 кг.

На основе ЛБВ фирма  $\lambda/4$  Quarterwave Corporation [24] разработала и реализовала усилительную систему MODEL 9321/94700-M93M95 с выходной непрерывной мощностью 50 Вт в полосе 93—95 ГГц, включающую ЛБВ, блок питания, систему охлаждения, систему контроля и управления режимом работы. Усиление системы 43 дБ, общая масса модуля ~54,5 кг, размер шасси ~73×47×70 см. Охлаждение — принудительное воздушное.

На основе совершенствования базовой ЛБВ типа 814Н была разработана мощная ЛБВ типа 826Н [2, 17] с уровнем выходной импульсной мощности 1 кВт ( $K = 10\%$ ), усиление 25 дБ при неравномерности 3 дБ в полосе 93—95 ГГц. Фокусировка электронного пучка с напряжением 35 кВ и током 400 мА осуществлялась соленоидом. Масса соленоида компенсировалась тем, что за счет высокого токопрохождения пучка удалось использовать принудительное воздушное охлаждение.

В ЛБВ типа 980Н [2, 17] было достигнуто усиление 50 дБ в несколько меньшей полосе частот 93,25—94,75 ГГц и более высоком напряжении питания 39 кВ и токе пучка 390 мА при сохранении импульсной мощности 1 кВт и  $K = 10\%$ .

При дальнейшей доработке этого прибора удалось поднять уровень выходной мощности до 3 кВт при той же величине  $K$  в полосе 95—96 ГГц. В этой модификации ЛБВ так же, как и в ЛБВ типа 826Н, применяется анодная модуляция пучка и его фокусировка в массивном соленоиде, но охлаждение жидкостное.

### *ЛБВ с ЗС типа гребенка*

Как видно из приведенного рассмотрения ЗС типа ЦСР, в отличие от спиральной ЗС обеспечивает устойчивую работу прибора при больших тепловых нагрузках и является механически более прочной, но в более узкой полосе частот.

Более перспективными в этом отношении являются ЗС, сочетающие свойства спирали и ЦСР. Одной из таких систем является ЗС типа гребенка. В создании ЛБВ миллиметрового диапазона с ЗС типа гребенка значительные результаты получены фирмой AEG-Telefunken (Германия). Этой фирмой с использованием ЗС типа двойная гребенка (рис. 6) разработана ЛБВ для ракетной ГСН [25, 26] 8-миллиметрового диапазона с сеточным управлением ( $U_n = -200$  В; +120 В).

Прибор работает как в импульсном режиме с выходной мощностью 900 Вт при средней мощности 300 Вт в полосе частот 1 ГГц на частотах 33—36 ГГц, так и в непрерывном с выходной мощностью 200 Вт при рабочем напряжении 19—20 кВ, токе пучка 650 мА и токе ЗС 50 мА. КПД прибора с двухступенчатой рекуперацией 25 %, масса прибора 2,5 кг. Прибор может работать без принудительного охлаждения 30 с со средней мощностью 300 Вт.

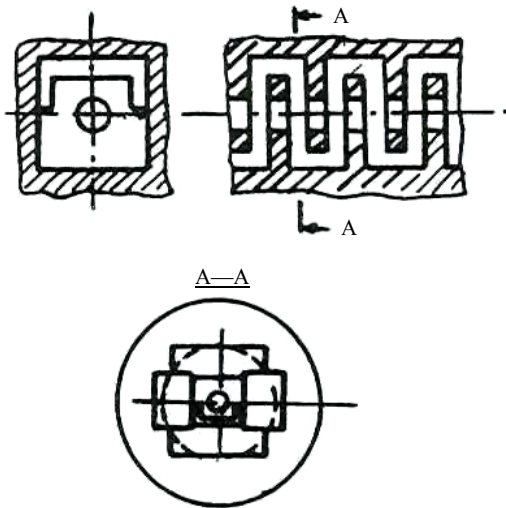


Рис. 6. Замедляющая система типа двойная гребенка

В средне- и коротковолновой частях миллиметрового диапазона с применением ЗС типа гребенка были разработаны ЛБВ также с хорошими для практического применения параметрами. ЛБВ типа TL44020 [27, 28], предназначенная для наземных станций военной системы спутниковой связи на частотах 43,5—45,5 ГГц, была спроектирована фирмой AEG на параметры: выходная мощность в непрерывном режиме 200 Вт, коэффициент усиления 43 дБ, напряжение на ЗС 15—23 кВ, ток пучка 270—350 мА, фокусирующая система МПФС, масса 5,5 кг.

Этой же фирмой разработана ЛБВ типа TL62010 [27, 29, 30] для применения в системах связи между спутниками в диапазоне частот 59—64 ГГц и выполненная в связи с этим с достаточно малыми габаритными размерами 32×5×5 см и массой 2,5 кг. Выходная непрерывная мощность 13 Вт, усиление в режиме насыщения 33 дБ, полоса частот 1 ГГц, КПД 19 % (с одноступенчатым коллектором) обеспечивались в приборе при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка 52 мА.

В работе [31] приведено интересное сопоставление параметров двух ЛБВ 59—64 ГГц диапазона частот, выполненных в двух вариантах.

В первом варианте прибора использовалась спиральная ЗС, а во втором — гребенчатая ЗС (*interdigital line*). В спиральной ЛБВ получены параметры: мгновенная полоса частот 5 ГГц, выходная непрерывная мощность 20—35 Вт, усиление (насыщение) 45 дБ, электронный КПД 10 %, технический КПД (с трехступенчатым коллектором) более 35 %, масса 650 г, анодное напряжение 10 кВ. В ЛБВ с гребенчатой системой параметры, соответственно: 1,5 ГГц (внутри общей полосы 5 ГГц), 60—100 Вт, 40 дБ (насыщение), электронный КПД 4 % и более 20 % технический

(с одно- или двухступенчатой рекуперацией), анодное напряжение  $\approx 20$  кВ, масса прибора 1,5 кг.

Из сопоставления данных двух вариантов заметно существенное преимущество спиральной ЛБВ средневолнового диапазона по большинству параметров.

Из приведенного рассмотрения видно, что спиральные ЛБВ вполне конкурентны приборам с гребенчатыми ЗС вплоть до частот 60—65 ГГц и мощностей  $\approx 20$ —30 Вт. Но при продвижении в более коротковолновый участок миллиметрового диапазона неизбежен предел. В то же время, как показало рассмотрение, такого ограничения нет для приборов с гребенчатыми системами. Это нашло убедительное подтверждение в разработанной фирмой TTEGmbH ЛБВ 3-миллиметрового диапазона, выполненной на ЗС типа двойная гребенка (*double comb delay line structure*) [32] и предназначенной для систем военной радиолокации. Как отмечают авторы [32], при разработке 3-миллиметровой ЛБВ были использованы техническая база и накопленный опыт в период создания ЛБВ на 30—35 ГГц (для корабельных и ракетных РЛС), а также ЛБВ на 60 ГГц (для космического применения). Модернизация технологии была проведена в соответствии с требованиями, связанными с укорочением длины волны, т. е. с резким уменьшением геометрических размеров ЗС.

Замедляющая система ЛБВ представляла собой структуру типа пальцы в пальцы (*interdigital delay line*), подобную сложенному волноводу (*folded waveguide*). В приборах использовалась модифицированная пушка Пирса с сеточным управлением электронным потоком. Электронно-оптическая система при ускоряющем напряжении 22 кВ (напряжение на сетке  $\sim 400$  В) формировала электронный пучок с диаметром менее чем  $\sim 0,4$  мм и током пучка 190 мА (max) при массе магнитной системы с прибором 1,3 кг. Весьма низкий электронный КПД 2,4—3,6 % увеличивается до 15 % путем понижения потенциала одноступенчатого коллектора обычной конфигурации, охлаждаемого через керамический цилиндр. В работе приведены результаты экспериментальных измерений прибора в режиме большой мощности с малым коэффициентом заполнения  $\sim 10$  %.

На рис. 7, а представлены результаты измерения амплитудно-частотной характеристики при величине входной мощности 2 мВт, а на рис. 7, б — частотная зависимость коэффициента усиления. Как видно из рис. 7, а, б, прибор может работать при соответствующей подстройке (путем выбора электрического режима) в двух различных

частотных областях. Минимальная величина выходной мощности для каждой из частотных полос ~150 Вт, максимальная — 200 Вт, а коэффициент усиления в насыщении более 45 дБ в полосе частот более 500 МГц.

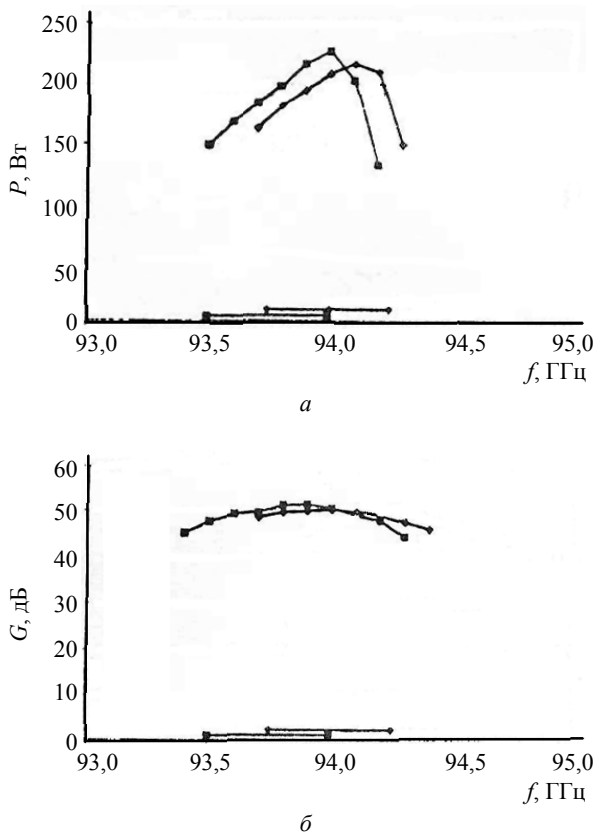


Рис. 7. Зависимости от частоты (для различных частотных полос, отмеченных по горизонтали): а — выходной мощности прибора при входной мощности 2 мВт; б — коэффициента усиления в насыщении

#### ЛБВ с ЗС типа петляющий волновод

Замедляющие системы типа петляющий (свернутый) волновод обладают большей механической прочностью и теплорассеивающей способностью по сравнению со спиральной системой и в то же время большей широкополосностью и технологичностью изготовления по сравнению с ЗС типа цепочки связанных резонаторов.

Работы по созданию таких ЗС и приборов на их основе проводились такими фирмами как Northrop, Raytheon, Hughes (США). Так, фирмой Northrop по заказу ВВС (США) была проведена разработка ЛБВ [33, 34] с мгновенной полосой усиления 40—54 ГГц при выходной мощности более 100 Вт и фокусировке электронного пучка магнитной системой типа МПФС. При этом требовалось обеспечить указанные параметры с использованием короткой усилительной секции

без разрывов и поглотителей. В качестве такой ЗС была выбрана система типа петляющий волновод (*serpentine waveguide*), показанная на рис. 8.

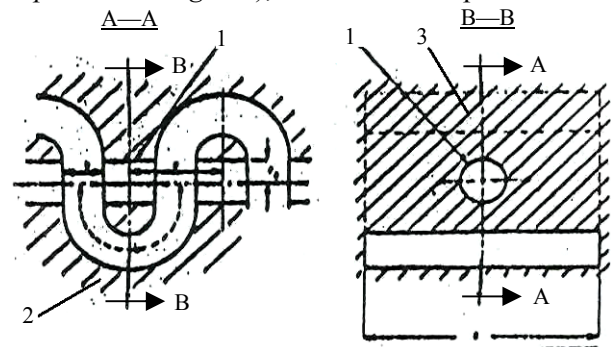


Рис. 8. Поперечное сечение ЗС типа петляющий волновод: 1 — пролетный канал; 2 — сечение по А—А; 3 — сечение по В—В

Как видно из этого рисунка, электронный пучок проходит через ЗС, где периодически взаимодействует с ВЧ-полем бегущей волны. Эффективное взаимодействие осуществляется с гармоникой, для которой фазовый сдвиг на элемент структуры лежит в пределах от  $\pi$  до  $2\pi$ .

Электронно-оптическая система обеспечивала токопрохождение 94 % через пролетный канал ЗС диаметром 0,7 мм электронного пучка с током ~200 мА при ускоряющем напряжении ~21,5 кВ. Коэффициент усиления в приборе был менее 10—12 дБ. Ввиду этого достаточно высокий уровень выходной мощности более 200 Вт достигается лишь при входном сигнале мощностью 15 Вт. Однако, как показали авторы [33], вполне возможно обеспечить усиление 30 дБ за счет использования нескольких последовательно состыкованных (через секции с поглотителями) секций. В отношении уровня выходной мощности такая ЗС представляет большие возможности. Так, в приведенном эксперименте при выборе оптимальной величины ускоряющего напряжения, равного 22,2 кВ на частоте 43,53 ГГц, была получена выходная мощность в режиме недонасыщения 306 Вт при электронном КПД 7,1 %. Ввиду этого, а также с учетом технологичности изготовления (методом электроискровой резки) такая система вполне перспективна для коротковолнового участка миллиметрового диапазона.

В работах [35, 36] сообщается о разработке сотрудниками фирмы Hughes трех ЛБВ с ЗС типа свернутый волновод, изготовленных электроискровым способом с управлением от ЭВМ. Одна из них представляет собой ЛБВ с фокусировкой с помощью соленоида, интегрированного с прибором. Эта ЛБВ обеспечивает выходную непрерывную мощность 1

кВт на частоте 45 ГГц, вторая — с МПФС с фокусировкой с непрерывной выходной мощностью 200 Вт на частоте 60 ГГц и третья — с МПФС с фокусировкой и мощностью 100 Вт на частоте 94 ГГц.

В [37] сообщается о двух программах по разработке ЛБВ 3-миллиметрового диапазона. В одной из них исследуется возможность создания на основе использования петляющего волновода ЛБВ (для применения в спутниках и наземных системах связи) с параметрами: выходная ВЧ-мощность 10 Вт на частоте 83,5 ГГц, усиление 30 дБ, частотная полоса 3 ГГц, ускоряющее напряжение 10 кВ, ток пучка 28 мА. Для увеличения КПД используется скачок скорости, а для обеспечения хорошего согласования системы — силиконовый поглотитель в виде двухступенчатого конуса. Пролетный канал — квадратного сечения.

Используются одноступенчатый коллектор и фокусирующий соленоид. В рамках другой программы используется меандровая ЗС, расположенная на алмазной подложке.

Применяются два способа изготовления такой системы: лазерная резка и химический.

В [38] сообщается о предварительных результатах по разработке ЛБВ с ЗС типа петляющий волновод с выходной импульсной мощностью 250 Вт (предварительный эксперимент дал 130 Вт) и средней мощностью 125 Вт на частоте 94 ГГц, усиление в режиме насыщения 23 и 30 дБ в режиме малого сигнала. В приборе применяется тетродная электронная пушка, обеспечивающая формирование электронного малопульсирующего пучка с напряжением 20 кВ и током 275 мА.

### ЛБВ с ЗС типа лестница

Среди мощных ЛБВ, использующих ЗС в виде модифицированных цепочек связанных резонаторов с большими теплорассеивающими способностями в миллиметровом диапазоне и особенно в его коротковолновой части, наиболее перспективными являются ЛБВ с лестничными ЗС, представляющими собой видоизмененный П-образный волновод [39], в широкой стенке которого прорезаны поперечные щели (рис. 9).

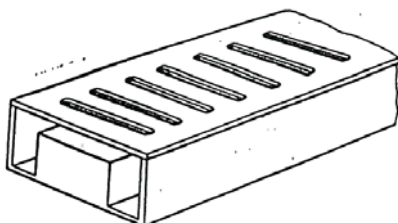


Рис. 9. Замедляющая система типа "лестница с выступом"

Такая стенка эквивалентна ряду параллельных проводников с закрепленными концами. При емкостной нагрузке в середине проводников (гребень посередине волновода) основная волна системы является прямой.

Одной из эффективных ЛБВ с лестничной ЗС, предложенной Карпом, является ЛБВ, разработанная фирмой Varian для систем космической связи в диапазоне частот 28—29 ГГц (ширина полосы более 2,0 %), с выходной мощностью 400 Вт на частоте 28,1 ГГц и электронным КПД ~17 %. В приборе использована модифицированная ЗС лестничного типа (туннель-лестница) с хорошим теплоотводом и эллиптическим пролетным каналом [2]. Изготовление сложных мелкоструктурных лестничных ЗС миллиметрового диапазона в значительной мере облегчается за счет сборки их из отдельных простых элементов. Например, в ЗС, представленной на рис. 10, система состоит из основных элементов: центрального, состоящего из двух направляющих, образующих плоские резонаторы и пролетный канал для электронного пучка, и боковых элементов, в которых имеются пазы или отверстия, обеспечивающие поочередную (с противоположных сторон) связь между резонаторами [40, 41].

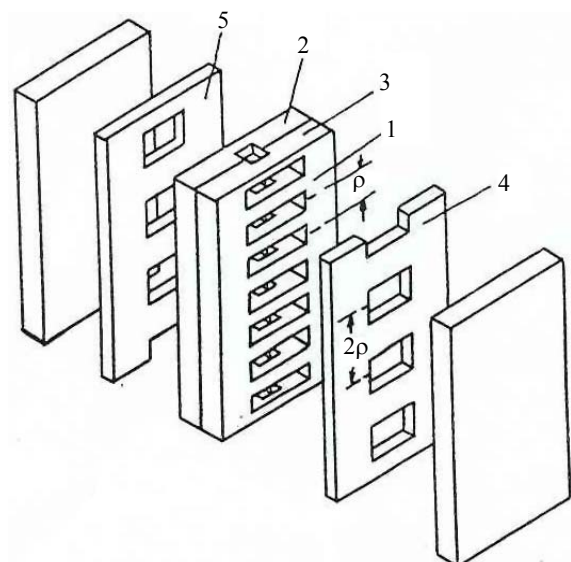


Рис. 10. Замедляющая система с лестничной структурой, подобной цепочке связанных резонаторов:

1 — центральный элемент; 2, 3 — направляющие (образующие центральный пролетный канал и цепочку плоских резонаторов); 4, 5 — боковые элементы с пазами (отверстиями) связи между резонаторами

На основе ЗС типа совмещенной сдвоенной лестницы фирмой Varian создана мощная ЛБВ типа VTW-5795 (миллитрон 3-миллиметрового диапазона) с выходной импульсной мощностью ( $K = 10\%$ ) 6 кВт, полосой 1 ГГц, коэффициентом усиления в насыщении 46 дБ.

Для фокусировки электронного пучка с напряжением 49,5 кВ, током 1,2 А использовался соленоид с уровнем магнитного фокусирующего поля 0,8 Тл. При этом в пучке уровень пульсаций  $\sim 10\%$  [42—44]. Наиболее хороший результат получен этой же фирмой при разработке двухлучевой ЛБВ типа VTW-6490 Millitron с лестничной ЗС с двойными поперечно-ориентированными отверстиями связи [23, 27, 45, 46], обеспечивающей 100 Вт на частотах 80—100 ГГц ( $\Delta f = 20\%$ ), коэффициент усиления (в насыщении) 40 дБ при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе пучка 150 мА. Масса прибора с магнитной фокусирующей системой типа МПФС равна  $\sim 6,8$  кг. Охлаждение — жидкостное.

Используется понижение потенциала коллектора до 12 кВ. Общая длина прибора  $\sim 61$  см. Как показывает опыт, ЛБВ подобного типа не только дешевле обычных ЛБВ на ЦСР миллиметрового диапазона, но и могут иметь более широкие полосы частот, большие тепловые запасы и более высокие значения импеданса взаимодействия волны и электронного пучка, чем другие известные конструкции ЛБВ [46, 47].

В [48] проведен теоретический анализ и показана возможность создания ЗС лестничного типа (*suspended ladder circuit*), работающей на высших видах колебаний (по сравнению с основным видом) для ЛБВ со средним уровнем выходной мощности 1 кВт на частоте 95 ГГц при условии токооседания не более 1 % на ЗС электронного пучка с напряжением 12 кВ и током 660 мА.

#### **Клистроны, клистроны с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона**

Клистронные усилители являются более предпочтительными, нежели ЛБВ в тех применениях, где не требуется широкая полоса частот. Они являются менее дорогостоящими в производстве и более выгодны в эксплуатационном отношении.

Ведущее положение в разработке различных типов клистронов занимает фирма СРІ (бывшая Varian). Разработанный этой фирмой усилитель VKA7852 для РЛС диапазона 35 ГГц [49] имеет выходную импульсную мощность 2,6 кВт в полосе 110 МГц при средней мощности 500 Вт и высокий коэффициент усиления 50 дБ. Последнее дает

возможность подавать на вход усилителя сигнал мощностью 40 мВт непосредственно от твердотельного источника. В приборе осуществляется эффективная сеточная модуляция интенсивного электронного пучка. Так, при напряжении 14,3 кВ и токе пучка 1,1 А последний модулируется напряжением на сетке  $\pm 300$  В (4,2 % от рабочего напряжения). Величина емкости сетки составляет 40 пФ. Внутримпульсный шум клистрона в паузе между импульсами при наличии входного сигнала составляет 50 дБ·(мВ/кГц). Необходимо отметить, что в коротковолновой части миллиметрового диапазона обычные клистроны не имеют перспектив из-за снижения эффективности взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями, а также из-за их значительной узкополосности. Клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ) с укорочением длины волны проявляют все большее преимущество по сравнению с обычными клистроном и ЛБВ. Фирмой СРІ создана серия усилительных КРВ импульсного и непрерывного действия на частоты 35—94—110—140 ГГц и более [50, 51]. Среди них отметим клистрон VKA2400 для систем связи "земля—спутник", в котором обеспечивается выходная непрерывная мощность 1 кВт в диапазоне 27—31 ГГц с мгновенной полосой 400 МГц, усилением 43 дБ при напряжении 7 кВ и токе пучка 500 мА.

В разработанном КРВ типа VKQ2471 [51] на частоте 36 ГГц импульсная выходная мощность составляет 1,7 кВт, усиление 40 дБ, мгновенная полоса частот 280 МГц ( $-3$  дБ) при анодном напряжении 13 кВ и токе пучка 680 мА. Импульсные напряжения на управляющей сетке 3,5 кВ, длительность импульса 20 мкс,  $K = 1,0\%$ , масса 6,3 кг.

В [52] сообщается о разработке фирмой СРІ КРВ 8-миллиметрового диапазона (35 ГГц) с выходной мощностью 3 кВт. В приборе используется электродинамическая система лестничного типа. Охлаждение — кондуктивное. Прибор пакетирован с постоянным магнитом массой 7 кг.

В коротковолновой части миллиметрового диапазона этой фирмой также создан ряд эффективных КРВ [50, 51].

В КРВ типа VKB2463T на частоте 94,5 ГГц при напряжении 10 кВ и токе пучка 120 мА обеспечивается выходная мощность в непрерывном режиме 50 Вт, усиление 30 дБ (в насыщении) и мгновенная полоса частот 100 МГц. В КРВ типа VKB2468 на частоте 95 ГГц

мгновенная полоса частот увеличена до 380 МГц, усиление в насыщении до 35 дБ, а выходная непрерывная мощность до 60 Вт при анодном напряжении 9,2 кВ и токе пучка 85 мА. Увеличение выходной непрерывной мощности КРВ на этой же частоте до 110 Вт при сохранении усиления 35 дБ и уменьшении полосы частот до 340 МГц было получено при ускоряющем напряжении 10,5 кВ и токе пучка 100 мА.

С использованием разработанных КРВ фирмой СРІ создан усилительный модуль серии VZB2788 на частоты 93—97 ГГц с выходной непрерывной мощностью 100 Вт, мгновенной полосой 280 МГц, усилением 40 дБ (в насыщении), коэффициентом шума 45 дБ, фазовыми шумами  $-128$  дБ/Гц. Размеры КРВ  $170 \times \varnothing 130$  мм, масса 7 кг. В модуль входят также блок питания, система мониторинга и система жидкостного охлаждения. Размеры модуля  $240 \times 178 \times 610$  мм, масса 20 кг. Общее охлаждение модуля — принудительное воздушное.

Среди мощных импульсных КРВ коротковолновой части миллиметрового диапазона, разработанных этой же фирмой, наиболее интересные результаты получены в приборах VKB2449T, VKB2469T, VKB2469 и VKB2475. В VKB2449T на частоте 94,5 Гц выходная импульсная мощность 1 кВт ( $K = 1,0 \%$ ), полоса 200 МГц, усиление 30 дБ, в VKB2469T (диапазон 94—95 ГГц) обеспечивается выходная импульсная мощность 1 кВт ( $K = 1,0 \%$ ), усиление 45 дБ и мгновенная полоса частот 350 МГц (по уровню  $-3$  дБ) при напряжении 17 кВ и токе пучка 650 мА. Масса прибора 6,5 кг.

В более совершенной модификации VKB2469 при напряжении 16 кВ и токе пучка 590 мА достигается импульсная выходная мощность 1,6 кВт, электронный КПД = 17 % при достаточно широкой полосе частот 500 МГц. У прибора также хорошие энергетические данные: длительность импульса 20 мкс,  $K = 1,0 \%$ , сеточное управление 2,5 кВ, охлаждение либо жидкостное, либо естественное. Масса прибора 4,2 кг. Прибор вместе с системой питания типа VPW3493(CPI) хорошо интегрируется в передающую подсистему типа VZB2940/41. Общее охлаждение модуля — воздушное принудительное. С использованием разработанных импульсных клистронов фирмой СРІ создан передающий модуль VZB2782/4 на

частоты 93—96 ГГц с выходной импульсной мощностью 1 кВт ( $K = 1,0 \%$ ), мгновенной полосой 450 МГц и усилением 45 дБ [51].

Из приведенной серии мощных импульсных КРВ наиболее широкая рабочая полоса частот  $-1,0$  ГГц достигается в VKB2475 (ускоряющее напряжение 17,1 кВ, ток пучка 705 мА) при неравномерности амплитудно-частотной характеристики на уровне 1 дБ, что сравнимо с результатами, получаемыми в ЛБВ. Результат уникальный, так как по выходной мощности 1,2 кВт (при КПД  $\sim 10 \%$ ) этот прибор мало уступает КРВ VKB2469. Модуляция сеточная с величиной управляющего напряжения 3 кВ. Средняя мощность прибора 150 Вт и, главное, возможна работа при длительности импульса

50 мкс. Последнее говорит о том, что в КРВ реализована очень хорошая электронно-оптическая система, поскольку при такой большой длительности импульса и удельной мощности в пучке порядка  $10$  МВт/см<sup>2</sup> устойчивая работа (без разрушения электродинамической системы) возможна лишь при обеспечении очень высокого уровня токопрохождения. Технический КПД в приборе увеличивается путем понижения потенциала коллектора на 7 кВ. Масса 5,5 кг, габаритные размеры  $\varnothing 180 \times 100$  мм. Охлаждение — жидкостное.

#### Таблицы основных параметров приборов О-типа миллиметрового диапазона

Результаты проведенного обзора состояния и развития усилительных приборов О-типа миллиметрового диапазона отображены в двух сводных табл. 1 и 2 основных параметров приборов, в которых приборы расположены в последовательности нарастания частоты от 27 до 100 ГГц. При этом в каждом из поддиапазонов последовательность в основном соответствует нарастанию выходной ВЧ-мощности. Последнее позволяет видеть, в каком из поддиапазонов какие типы приборов имеют преимущественное распространение, и какие выходные параметры ими обеспечиваются. Например, как видно из табл. 1, в длинноволновой части миллиметрового диапазона наибольшее распространение получили спиральные ЛБВ, в средневолновой части преобладающее положение имеют ЛБВ с ЗС типа ЦСР традиционной модификации, а в коротковолновой части прибора с ЗС типа гребенка, петляющий волновод и лестница.

№ п/п	Тип прибора, фирма	Диапазон частот, ГГц	$P$ , Вт	$K$ , %	$G$ , дБ	$U$ , кВ	$I$ , мА	Тип ЗС, МФС	Масса, кг	Литература
1	WJ-3638	35—40	10	100	24—28	9,0	24	Спир., МПФС	—	1, 2
2	N10043 EEV	27,5—39	20	100	40	9,0—10,0	55	Спир., МПФС	—	3, 4
3	Thoms.CSF	27,5—30	200	100	55	13,0	150	Спир., МПФС	—	7, 8
4	8926H L-3 CED	27,5—30	350—380	100	—	14,5	108	Спир., МПФС	2,5	11
5	8926HB L-3 CET	28—31	500	100	47	17,7	148	Спир., МПФС	2,5	12
6	8909H L-3 CED	33,4—36,0	1000	10	—	18,8	350	Спир., МПФС	—	11
7	913H	36—38	100	100	45	16,0	70	ЦСР, МПФС	5,45	17, 18
8	914H	30—31	200	100	35	16,0	70	ЦСР, МПФС	5,45	17, 18
9	AEG-T	33—36	900	33	—	19—20	650	Дв. гроб., МПФС	2,5	25, 26
10	QKW1995	36—38	1000	0,1	37,5	25,0	400	ЦСР, МПФС	2,5	19
11	RW-3010	36,7—38,2	1000	100	43	25,0	400	ЦСР, МПФС	~5,2	20
12	Varian	42,5—44,5	25	100	30	10,2—10,5	52—57	Спир., МПФС	—	13
13	NEC	42—45	24	100	—	10,1	52	Спир., МПФС	1,0	14
14	Module MMPMs	43—46	60	100	45	7,7	110	Спир., МПФС	—	16
15	TH3760	43,5—45,5	90	100	54	13,0	100	Спир., МПФС	3,5	15
16	8925H L-3 CET	43,5—45,5	200	100	42	14,2	118	Спир., МПФС	1,6	12
17	TL44020	43,5—45,5	200	100	43	15—23	270—350	Дв. гроб., МПФС	5,5	27, 28
18	941HA Hughes	43,5—45,5	250	100	54 нас.	22,5	100	ЦСР, МПФС	7,3	17, 27
19	Varian	43,5—45,5	250	100	50 нас.	22,0	150	ЦСР, МПФС	6,8	23, 27
20	Northrop	40—54	100	100	12	21,5	200	П.В., МПФС	—	33, 34
21	813H	55—56	1000	100	20	25,0	400	ЦСР, сол-д	—	2, 17, 18
22	819H	55—56	5000	100	20 (17 нас.)	45,0	900	ЦСР, сол-д	—	2, 17, 18
23	960HA	60—60,7	10	100	50	13,4	17	ЦСР, МПФС	~3,6	22
24	TL62010	59—64	13	100	33 нас.	15,0	52	Дв. гроб., МПФС	2,5	27, 29, 30
25	TTEG(1)	59—64	20—35	100	45 нас.	10,0	25	Спир., МПФС	~0,7	31
26	920H	59,7—60,3	50	100	35	15,5	60	ЦСР, МПФС	5,9	17
27	TTEG(2)	59—60,5	60—100	100	40 нас.	20,0	80	Дв. гроб., МПФС	1,5	31
28	н/р *	82—85	10	100	30	9,0	28	П.В., МПФС	—	37
29	814H	91—96	100—150	100	15	25,0	170	ЦСР, пост. маг.	14,8	19
30	982H	93—95	100	50	55—44	22,0	88	ЦСР, МПФС	5,45	2, 17
31	Model M93M95	93—95	50	100	43	—	—	ЦСР, МПФС	54,5	24
32	TTEG	94—95	150/100	10/20	45/40	22,0	190	Дв. гроб., МПФС	1,3	32
33	VTW-6490	80—100	100	100	40 нас.	25,0	150	Лестн., МПФС	6,8	23, 27, 45
34	826H	93—95	1000	10	25	35,0	400	ЦСР, сол-д	—	2, 17
35	980H	95—96	3000	10	50	39,0	390	ЦСР, сол-д	—	2, 17
36	VTW-5795	94,5—95,5	3000	10	50 нас.	49,5	1200	ЦСР (лестн.), сол-д	—	42, 43, 44

Таблица 2

## Усилительные КРВ миллиметрового диапазона

№ п/п	Тип прибора	Диапазон частот (серия), ГГц	Центр. частота, ГГц	$P$ , Вт	$K$ , %	Мгновенная полоса, МГц	Усиление, дБ	$U$ , кВ	$I$ , мА	Масса, кг	Литература
1	VKA2400	27—31	30,4	1000	100	400 (-1 дБ)	43	7,0	500	—	50, 51
2	VKQ2471	33—36	36	1700	1,0	280 (-3 дБ)	40	13,0	680	6,3	51
3	н/р*, CPI	33—35	35	3000	25	—	—	—	—	7,0	52
4	VKB2463T	93—95	94,5	50	100	100 (-3 дБ)	30	10,0	120	—	50, 51
5	VKB2468	93—95	95	60	100	380 (-3 дБ)	35	9,2	85	—	50, 51
6	VKB2468*	93—95	95	110	100	340 (-3 дБ)	35	10,5	100	7,0	50, 51
7	VZB2788	93—97	94	100	100	280 (-3 дБ)	40	—	—	20,0	51
8	VKB2449T	94—95	94,5	1000	1,0	200 (-3 дБ)	30	—	—	—	50, 51

9	VKB2469T	94—95	94,5	1000	1,0	350 (–3 дБ)	45	17,0	650	6,5	50, 51
10	VKB2469	93—96	95	1600	1,0	500 (–3 дБ)	48	16,0	590	4,2	51
11	VKB2475	93—96	94,5	1200	10,0	1000 (–1 дБ)	47	17,1	705	5,5	51
12	VZB2782/4	93—96	94	1000	1,0	450 (–3 дБ)	45	—	—	—	51

Использованные в табл. 1 и 2 сокращения: н/р\* — научная разработка; П.В. — петляющий волновод; дв. греб. — двойная гребенка; сол-д — соленоид; спир. — спиральные. В табл. 1: Module MMPMs, Model M93M95 — усилительные подсистемы, включающие: ЛБВ, источники питания, системы охлаждения и системы управления и т. д. В табл. 2: VZB2788 и VZB2782/4 — усилительные модули, включающие: клистрон, источники питания, системы охлаждения, системы управления и т. д.

### Заключение

Рассмотрены состояние разработок и тенденции развития усилительных приборов О-типа миллиметрового диапазона. Показано, что продвижение в коротковолновую часть миллиметрового диапазона в значительной мере связано с поиском и реализацией эффективных электродинамических систем, схем взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями, электронно-оптических систем формирования и транспортировки электронных пучков, а также оптимальных конструктивно-технологических решений.

Представленный в обзоре опыт ведущих фирм может быть полезен разработчикам при выборе направлений исследований по созданию эффективных приборов О-типа и особенно усилителей коротковолновой части миллиметрового диапазона.

### Литература

1. Clark P., Schram T. L., Wada G. New developments in Ka band: a10W cw helix type TWT: International Electron Devices Meeting, Washington. — New York, N.Y., 1976. P. 373—376.
2. Перельгин А. В., Русаков Н. А., Явчуновский В. Я. Обзор по электронной технике. Зарубежные ЛБВ миллиметрового диапазона, выходные характеристики, конструктивно-технологические решения: Обзоры по электронной технике. Сер. 1// Электроника СВЧ. 1985. Вып. 5(1082). С. 6, 7, 17, 50.
3. Palacoff B. Broad band, high-power devices// Microwave J. 1985. V. 28. No. 2. P. 69—90.
4. Явчуновский В. Я., Миркин В. И., Фалькенгоф А. Е. Предельные уровни мощных спиральных ЛБВ: Обзор по электронной технике. Сер. 1// Электроника СВЧ. 1986. Вып. 9(1195). С. 27—29.
5. Innovative TWT design for 200W cw from 20 to 40 GHz// Microwaves. 1979. V. 18. No. 11. P. 19.
6. Fleury G., Deville C., Kuntzmann Y. C. Average Power Limits of Brazed-Helix TWT'S-In: International Electron Devices Meeting, Washington. New York, N. Y., 1980. P. 41—47.

7. IDEM, 1986. Technical Digest. P. 505—507.
8. БОНТИ НПП "Исток" Сигнал// Новости зарубежной электроники. 1990. № 32(132). С. 5—9.
9. NTT Review. 1992. V. 4. No. 4. P. 63—68.
10. High power cw and pulsed microwave amplifiers model 9321/95300–K27K30 and model 9100/95020–K33K36 The "λ/4 Quarterwave Corporation report in Internet", 2003.
11. Chong C. K., Davis J. A., Forster J. W. et al. Development of 400W CW Ka-Band Communications Helix-TWT and 1 kW Peak Power Ka-Band Radar Helix-TWT// Proceedings IEEE IVEC/IVESC 2006, Monterey, California, USA, Apr. 25—27 2006. A. Book of Abstracts NY, 2006. P. 179, 180.
12. Chong C. K., Dawson R. C., Forster J. W. et al. Development of 500W CW Ka-Band Helix-TWT and 200W/Q-Band Helix-TWT for Communications Applications// Ninth IEEE IVEC 2008 Monterey, California, USA, Apr. 22—24, 2008. A. Book of Abstracts NY, 2008. P. 191, 192.
13. Jaquez A. 44 GHz helix TWTs for satellite communication systems// International Electron. Dev. Meeting New York, San Francisco, 1984.
14. NEC Research Development. 1991. V. 32. No. 2. P. 227—231.
15. Microwaves & RF. 1992. V. 31. No. 2. P. 119.
16. Taylor J., Schoemehl, Kennedy J. et al. Resent Advances in mm. Wave Power Modules (MMPMs)// Proceedings IEEE IVEC/IVESC 2006, Monterey, California, USA, Apr. 25—27, 2006. A. Book of Abstracts N.Y., 2006. P. 405, 406.
17. Hughes TWT and TWTA, 1980 Selection Guide: Catalogue// Hughes Aircraft Company. — Torrance, California, 1980. — 7 p.
18. Harman W. A., Kennedy T. B., Tammary J. Design of PPM focused high efficient space TWT at millimeter wave lengths-IEDM, Washington-New York, N. Y., 1976. P. 377—380.
19. Microwave Date book. 1981. No. 46. P. 215.
20. Seunik H., Gross F., Wallemders S., Weinzierl F. 1kW cw PPM-focused TWT for upper Ka band// Microwave System News. 1974. V. 4. No. 6/7. P. 43.
21. Chernin D., Dialelis D., Antonsen et al. Validation Studies for CHRISTINE a Ka-Band Capl-Cavite TWT// Proceedings IEEE IVEC/IVESC. 2006, Monterey, California, USA, Apr. 25—27, 2006. A. Book of Abstracts N.Y., 2006. P. 399, 400.
22. Каталог фирмы, Hughes "TWT and TWTA Listing", 1990.
23. Каталог фирмы "Varian Coupled-Cavity Tubes", 1988.
24. Интернет-сайт фирмы "λ/4 Quarterwave Corporation". Manufacturer of High Power Traveling Wave Tube Amplifiers, Int. 2003.
25. Military Microwaves'90: Conference Proceedings. P. 335—339
26. Сигнал-новости зарубежной техники БОНТИ НПП "Исток". 1992. № 4(177).
27. Андрианова Е. П. Зарубежные ЛБВ и ЛОВ, рекламированные в 1990—1991 гг.: Справочные материалы по электронной технике. — М.: ОНТИ ГНПП "Исток", 1992. С. 2—26.
28. Проект технических условий ЛБВ TL 44020 фирмы AEG "Wanderfeldrohre TL 44020 Entwurf", 1989.
29. Каталог фирмы "AEG-Telefunken". Technische Rohren. Professional Tubes, Microwave Tubes for Military Systems", 1984.

30. Каталог фирмы AEG "Traveling Wave Tubes: Satellite and Ground Station Applications", 1987.
31. Kornfeld G. K., Bosch E., Gerum W., Fleury G. 60-GHz Space TWT to Address Future Market// IEEE Transaction on Electron Devices. January 2001. V. 48. No. 1. P. 11—14.
32. Gerum W., Lippert G., Malzan P., Schneider K. 94-GHz TWT for Military Radar Application// Ibid. P. 15, 16.
33. Dohler S., Gagne D., Gallagher D., Moats R. Serpentine Waveguide TWT// IEDM' 87, Techn Digest. P. 485—488.
34. Новости зарубежной электроники// Сигнал. 1990. Вып. 8(108). С. 16—19.
35. Microwave Journal. 1990. V. 33. No. 12. P. 26.
36. Новости зарубежной электроники: Сигнал. 1991. Вып. 20 (157). С. 19.
37. Kory C., Ives R. L., Read M. et al. Overview of W-Band Traveling Wave Tube Programs// Proceedings IEEE IVEC/IVESC 2006, Monterey, California, USA, Apr. 25—27, 2006. A. Book of Abstracts NY, 2006. P. 447, 448.
38. Theiss A. J., Meadows C. J., Montgomery K. L., Martin M. Development of a High Average Power W-Band TWT// Proceedings IEEE IVEC 2008, Monterey, California, USA, Apr. 22—24, 2008. A. Book of Abstracts NY, 2008. P. 197, 198.
39. Karp A. Traveling wave tube experiments at millimeter wavelengths a new easily built space harmonic circuit// PIRE. 1955. P. 43. P. 41—46.
40. Karp A., Biggs G. A.: Pat. 1180809. Canada. Cl. 315/3,5 H 01 J 25/34 11.10.83.
41. Тесленко Л. Ф., Иванова А. В., Лысова И. К. и др.: Обзор по электронной технике. Сер. 1// Электроника СВЧ. 1989. Вып. 20(1503). С. 68.
42. СВЧ-техника// Зарубежная электронная техника. 1985. № 4. С. 96.
43. Афанасьева Е. В., Фалькенгоф А. Е., Хенкина А. С., Борисова Т. Г. Электровакуумные приборы миллиметрового диапазона волн: Тематический указатель литературы. Сер. 1// Электроника СВЧ. 1986. Вып. 4(213). С. 3.
44. James B. G., Kreutzer M. High power Millitron TWTs in W-band: Conference Digest of the 20th Int. Conference on IR & mm waves, 1995, Lake Buena Vista (Orlando). — Florida, USA, P. 13, 14.
45. Microwave Journal. 1989. V. 32. No. 7. P. 36.
46. Новости зарубежной СВЧ-техники// Сигнал, БОНТИ, НПП "Исток". 1992. Вып. 1(174).
47. Microwave Journal. 1990. V. 33. No. 12. P. 38.
48. Kory C. L., Read M., Ives R. L., Booske J., Borchard P. Design of Overmoded Interaction Circuit for 1kW, 95 GHz, TWT// Proceedings IEEE IVEC 2008, Monterey, California, USA, Apr. 22—24, 2008. A. Book of Abstracts NY, 2008. P. 193, 194.
49. Новости зарубежной электроники// Сигнал БОНТИ. 1987. № 24.
50. Каталог фирмы "Varian" Extended Interaction Klystron Selection Guide, 1986.
51. CPI Canada and the millimeter wave klystron (information site). Website: <http://www.cpii.com/cmp>
52. Roitman A., Swecney D., Mathison et al. Compact High Power Ka-Band EIK for Terrestrial and Space Application// Proceedings IEEE IVEC/IVESC 2006, Monterey, California, USA, Apr. 25—27, 2006. A. Book of Abstracts NY, 2006. P. 71, 72.

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2008 г.

## Millimeter-wave amplifier devices type-O

*A. V. Lyashenko, V. P. Eremin*  
Joint-Stock Company "Tantal", Saratov, Russia  
E-mail: solopov@tantal-2.renet.ru

*A. I. Toreev*  
Saratov State University, Saratov, Russia

*Analytical review of the millimeter wave amplifier devices type-O elaborations, executed by the leading foreign firms and research laboratories (organizations) is presented. Tendencies of the development such devices at the advancement in the shortwave millimeter wave range are considered.*

PACS: 41.20.-q