

# ВАКУУМНАЯ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА В 2010 ГОДУ: К МИЛЛИМЕТРОВОМУ И ТЕРАГЕРЦЕВОМУ ДИАПАЗОНАМ

И.Викулов i\_k\_vikulov@mail.ru

Ежегодная международная вакуумная конференция IVEC 2010, состоявшаяся в мае 2010 года в Монтерее (США), подтвердила, что стагнация, наметившаяся в мировой вакуумной электронике к началу 2000-х годов [1, 2], успешно преодолена. Один из стимулов к началу качественно нового этапа развития – начавшаяся интенсивная подготовка компонентной базы радиоэлектронных систем миллиметрового и терагерцевого диапазонов частот.

В начале 2000-х годов Агентство по перспективным оборонным исследовательским проектам МО США (DARPA) объявило открытый конкурс по программе развития интегральной вакуумной СВЧ-электроники HiFIVE [3]. Обязательным условием участия в программе являлась разработка компанией-претендентом принципиально новых технологий создания компактных вакуумных приборов коротковолновой части миллиметрового диапазона с выходной мощностью порядка десятков и более ватт. И на конференции IVEC 2010 были широко представлены разработки вакуумных приборов миллиметрового и терагерцевого диапазонов, а также новые результаты, достигнутые на традиционных приборах, работающих в обычном микроволновом диапазоне. Каковы эти достижения?

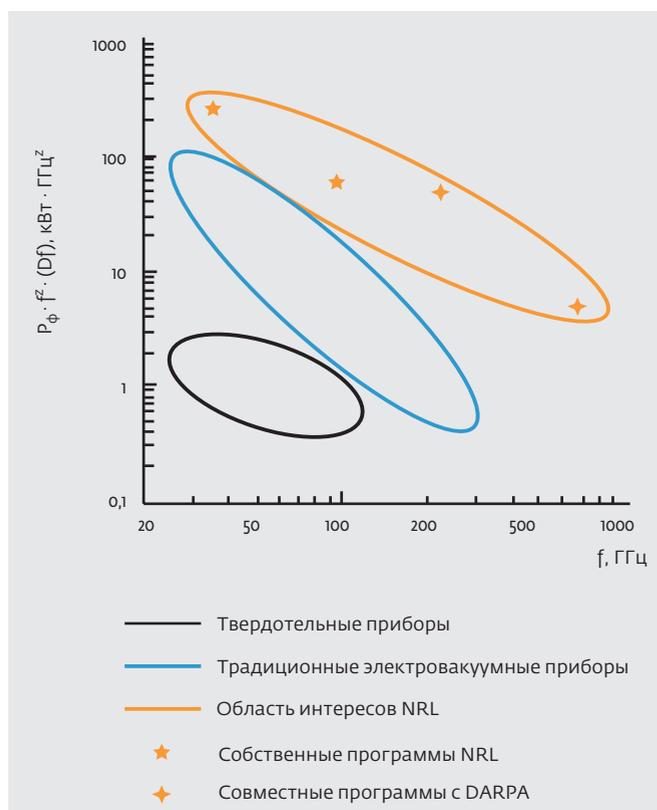
## ТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО И ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНОВ

### Основные задачи

В начале 2000-х годов DARPA начала развивать так называемую "терагерцевую инициативу" (THz Technology Initiative) с целью практического освоения терагерцевого диапазона частот 300 ГГц – 3 ТГц, отделяющего электронику от фотоники и называемого иногда "терагерцевым промежутком" (THz Gap). Такие физические свойства терагерцевого излучения, как беспрецедентно широкие полосы частот, способность проникать через непрозрачные среды (густой дым, туман, пыль, песчаное облако), открывают возможности его применения в различных коммерческих и военных системах. Это высокоскоростные линии

связи, высокоточные РЛС, способные работать в сложной электромагнитной обстановке, системы получения изображений с очень высоким разрешением, устройства дистанционной идентификации химических веществ и др. Поэтому DARPA рассматривает освоение терагерцевого диапазона как стратегическую задачу получения решающего информационно-технологического превосходства в любых вооруженных конфликтах. По мнению руководителя подразделения технологии микросистем (Microsystems Technology Office), входящего в состав DARPA, М.Роскера, "тот, кто владеет электромагнитным спектром, тот доминирует на поле боя" [4].

Обзор работ в области миллиметрового и терагерцевого диапазонов, показал, что основное внимание сейчас уделяется созданию электрон-



**Рис.1.** Перспективные разработки вакуумных электронных приборов в лаборатории NRL

ных приборов на частоты 90, 220, 460, 670, 850 и 1030 ГГц. Однако для практического освоения терагерцевого диапазона необходимы принципиально новые электронные компоненты и технологии их интеграции. С этой целью DARPA сосредоточило усилия на развитии следующих научно-технических направлений:

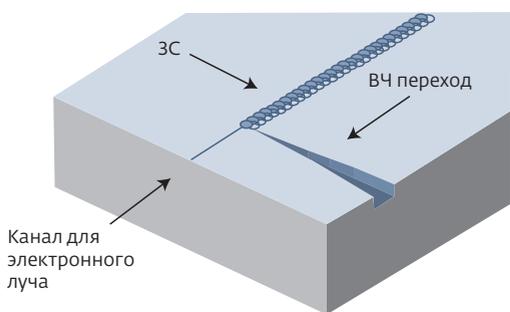
- компактные эффективные источники когерентного терагерцевого излучения большого и гетеродинного уровня мощности;
- высокочувствительные приемные терагерцевые решетки;
- межсхемные терагерцевые соединения с низкими потерями;
- цифровая обработка сигналов на терагерцевых частотах.

Отсутствие мощных эффективных и компактных источников терагерцевого излучения — главное препятствие в освоении терагерцевого диапазона. Как правило, размеры и первичная мощность питания объектов, или платформ, на которых предполагается размещать миллиметровые и терагерцевые системы, ограничены. Поэтому приборы на быстрых волнах большой мощности в миллиметровых и терагерцевых областях

спектра (например, гиротроны), не могут быть использованы в качестве источников, поскольку они требуют громоздких сверхпроводящих или импульсных магнитов. У традиционных вакуумных приборов на этих частотах из-за трудности прохождения электронных пучков через малоразмерные замедляющие структуры резко падает эффективность. Отсюда интерес к вакуумным приборам на основе технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) и современных трехмерных программ проектирования. По сути речь идет о создании самостоятельной ветви вакуумной СВЧ-электроники — вакуумной микроэлектроники миллиметрового и терагерцевого диапазонов. В США разработки вакуумных приборов для подобных систем проводятся по программам High Frequency Integrated Vacuum Electronics (HiFIVE) и THz Electronics (THzE), являющейся развитием THz Technology Initiative.

### Программы создания вакуумной СВЧ интегральной электроники

В программах развития СВЧ-интегральной вакуумной электроники активно участвуют крупные

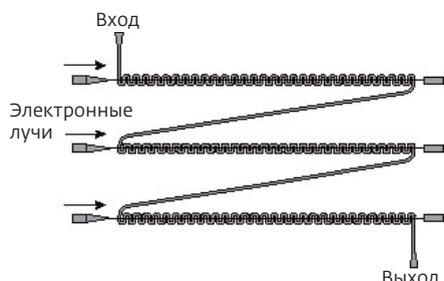


**Рис.2.** Замедляющая структура (ЗС) типа “свернутый волновод” компании Northrop Grumman

американские корпорации и организации. Наиболее широкий подход к проблеме создания вакуумных приборов миллиметрового и терагерцевого диапазонов характерен для Исследовательской лаборатории ВМС (Naval Research Laboratory, NRL) (рис.1). Кроме совместных разработок с DARPA NRL создает приборы на 220, 670, 850 и 1030 ГГц. Исследования включают все аспекты современной вакуумной электроники: изучение физики эмиссии, новые типы катодов, формирование и транспортировку электронных пучков, новые замедляющие системы и методы их изготовления, численный анализ нелинейного электронно-волнового взаимодействия и новые программы расчета.

Отделение электронных систем компании Northrop Grumman по программам HiFIVE и THzE разрабатывает мощные компактные вакуумные усилители на частоты между 100 ГГц и 1 ТГц. Задача первой фазы разработки по программе HiFIVE – продемонстрировать отдельные узлы компактного усилителя на 220 ГГц мощностью 100 Вт, в том числе прочную замедляющую структуру (ЗС) на свернутом волноводе (folded waveguide) с низкими потерями (рис.2) и электронный пучок с высокой плотностью тока 750 А/см<sup>2</sup>, имеющий токопрохождение через систему не менее 95%.

Цель первой фазы программы THzE – создание импульсного усилителя с высоким коэффициентом заполнения мощностью 100 мВт на 670 ГГц. Ре-



**Рис.3.** Принципиальная схема многокаскадной трехлучевой ЛБВ

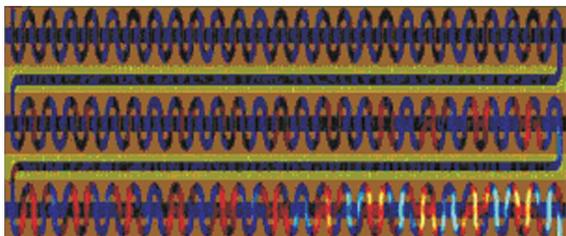
ализация полностью интегрированных мощных усилителей на этих частотах будет иметь большое значение для ряда военных применений. Из-за жестких требований к размерам и качеству поверхности замедляющих структур для создания усилителя применялись прецизионные методы микрообработки и сборки. А именно – глубокое реактивное ионное травление или LIGA-технология с использованием чувствительного в ближней УФ-области негативного фоторезиста на основе эпоксидной смолы EPON (UV/SU-8-технология). Замедляющая система состояла из двух половин, которые формировались на различных кремниевых пластинах и затем совмещались с точностью до 0,5 мкм. Шероховатость внутренних стенок волновода не превышала 50 нм. В более мощном усилителе на 220 ГГц было использовано разделение сигнала на входе и последующее суммирование его на выходе с помощью пяти аналогичных связанных ЗС. С каждой ЗС взаимодействовал отдельный электронный луч, входящий в состав пяти лучей, излучаемых катодной линейной решеткой. Расчет системы и согласования импедансов выполнялся по программам CRISTINE и HFSS.

Коэффициент усиления усилителя превышал 30 дБ, что достаточно для достижения режима насыщения при выходной мощности 50 Вт. В качестве катодов исследовались диспенсерный катод М-типа Semicon411 (плотность тока 25 А/см<sup>2</sup>) и бариевый камерный катод (50 А/см<sup>2</sup>). Расчет токопрохождения был проведен с помощью программы MICHELLE, а фокусирующей системы с планарным магнитом – на основе программы MAXWELL. Максимальное значение фокусирующего магнитного поля было равно 9,6 кГс, а поперечные магнитные поля вне области прохождения луча не превышали 30 Гс.

В усилителе на 670 ГГц применены однорядная ЗС и понижающий коллектор с КПД 93%. Из-за высоких потерь на этой частоте входное и выходное устройства выполнены максимально короткими. Проектируемый усилитель на 670 ГГц, испытания которого, а также и электронно-лучевой системы усилителя на 220 ГГц, планировались на первую половину 2010 года, должен был иметь следующие параметры:

Мощность, МВт . . . . .	92
Усиление, дБ . . . . .	22
Электронный КПД, % . . . . .	0,98
Полоса, ГГц. . . . .	0,52
КПД схемы, % . . . . .	0,56
Напряжение, кВ. . . . .	9,34
Ток, мА. . . . .	2,5

Вход



Выход

**Рис.4.** Геометрия и форма аксиального поля трехлучевой ЛБВ. Расчет по программе MAGIC-3D

Плотность тока, А/см<sup>2</sup>. . . . . 150  
 Токопрохождение, % . . . . . 75  
 Длина системы, см . . . . . 2,2  
 Компании Teledyne Scientific, Communications and Power Industries (CPI), Teledyne MEC, Beam-Wave Research и Калифорнийский университет в Дэвисе участвуют в совместной программе по разработке компактного легкого ЛБВ-усилителя на 220 ГГц с высоким коэффициентом усиления. Предусмотрена разработка скандатных наноструктурных катодов с плотностями тока более 100 А/см<sup>2</sup>, применение MEMS-технологии для изготовления волноводов и замедляющих структур и их испытания в диапазоне 220 ГГц с полосами более 50 ГГц, а также создание ленточных электронных пучков с плотностью тока 230 А/см<sup>2</sup> и соотношением размеров сечения 26:1. Конечная цель программы – выпуск усилителей на диапазон 220 ГГц с выходной мощностью 50 Вт, "горячей" полосой более 20 ГГц и производением мощности на полосу свыше 1000 Вт·Гц. В работе использована электронная пушка с электростатической фокусировкой с последующей компрессией луча магнитным полем. Катод эллиптической формы располагался в центре фокусирующего электрода. Замедляющая структура представляла собой волновод (770×690 мкм), составленный из двух внутренних встречно-штыревых линий. Толщина отдельного штыря – 115 мкм, высота – 270 мкм.

В Калифорнийском университете в Дэвисе разработана и оригинальная технология ЛБВ-усилителя с ленточным лучом на диапазон 0,22 ТГц. Для изготовления ЗС-прибора исследовались три разновидности МЭМС-технологии, которые обеспечивали допуски размеров 3–5 мкм и значение шероховатости поверхности не более 30 нм.

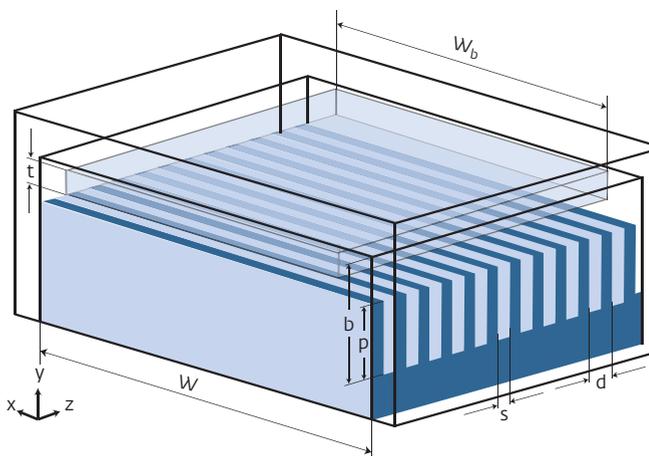
Отделением вакуумной электроники (Vacuum Electronics Branch) лаборатории NRL при участии компаний Beam-Wave Research и ATK-Mission

Research предложена новая концепция многокаскадной многолучевой ЛБВ (рис.3). От обычной ЛБВ она отличается тем, что выход каждого отдельного каскада связан с входом последующего каскада, в котором с СВЧ-полем взаимодействует уже другой электронный луч. Число лучей и значение усиления на один каскад ограничены только значением отражений от стыковок между каскадами. Большие потери на каскад в терагерцевом диапазоне фактически играют положительную роль, снижая вероятность самовозбуждения усилителя. В обычном однолучевом многокаскадном усилителе связь между каскадами осуществляется модулированным пучком электронов, тогда как в предлагаемом приборе передача сигнала от каскада к каскаду происходит с помощью непосредственного соединения по СВЧ.

В качестве ЗС выбрана змеевидная структура типа "свернутый волновод" (рис.4). Длина каждого каскада равна 1,5 см. Возбуждается каскад электронным пучком с током 100 мА и напряжением 20 кВ. Согласно расчету по программе MAGIC-3D, максимальная мощность усилителя составит

**Таблица 1.** Параметры ЗС типа "решетка" для усилителя сленточным лучом

Параметр	Условное обозначение	Значение
Период решетки, мкм	$d$	150
Ширина щели, мкм	$s$	75
Глубина щели, мкм	$p$	333
Высота канала для луча, мкм	$b-p$	250
Ширина решетки, мм	$w$	2,2
Ширина луча, мм	$wb$	1,8
Напряжение луча, кВ	$V$	19
Ток луча, А	$I$	0,5
Толщина луча, мкм	$t$	160

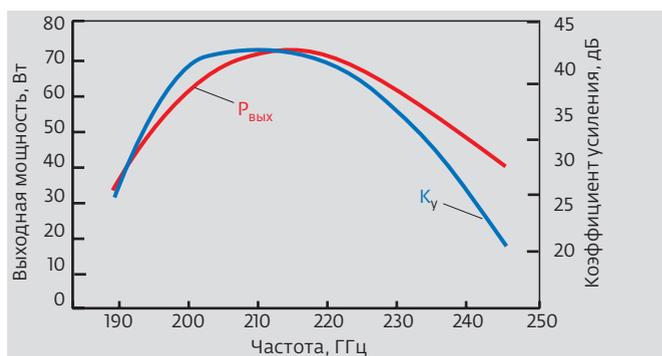


**Рис.6.** Геометрия замедляющей структуры типа "решетка" для усилителя 220ГГц, 50 Вт лаборатории NRL

73 Вт при коэффициенте усиления в насыщении 42 дБ и полосе 50 ГГц по уровню -3 дБ (рис.5).

ЛБВ на 220 ГГц, электронную пушку и катоды с полевой эмиссией разрабатывает Исследовательская лаборатория ВВС (Air Force Research Laboratory) с участием Университета Аризоны. Изучается возможность получения высокой плотности тока катодов, изготовленных на карбиде гафния, углеродном волокне и углеродных нанотрубках. Полевая эмиссия катода, фокусирующая оптика и характеристики пучка моделируются с помощью улучшенной версии программы "частица в ячейке" (Particle-in-Cell). В качестве ЗС рассматривается свернутый волновод с числом периодов 64. Оценки показывают, что такая ЛБВ при напряжении луча 25 кВ, диаметре канала 100 мкм и фокусирующем магнитном поле 5,4 кГс обеспечит усиление 21 дБ и мгновенную полосу 2,7% при КПД ~0,16%.

Возможность построения ЛБВ на диапазоны от 1 до 2,5 ГГц изучается в Университете Юты. Методом конечных элементов выполнен трехмерный



**Рис.5.** Выходная мощность в насыщении и коэффициент усиления широкополосной трехлучевой ЛБВ диапазона 220 ГГц

анализ нескольких типов замедляющих структур. Рассмотрены ЗС типа "свернутый волновод" на прямоугольном волноводе и на волноводе на фотонных кристаллах (photonic crystal waveguides), а также несколько вариантов встречно-штыревых ЗС. Структуры легко изготавливаются с помощью современных методов микрообработки.

Компания Creative MicroTech и Центр наноматериалов Аргонской национальной лаборатории разрабатывают технологию изготовления ЗС на свернутом волноводе для усилителя компании Northrop Grumman мощностью 100 Вт на 220 ГГц. ЗС изготавливается на медной пластине размером 10×10×0,5 см с использованием УФ-литографии. После нанесения фоторезиста SU-8 проводятся операции гальванического наращивания меди, выравнивания нанесенного слоя металла, удаления фоторезиста плазменным травлением и его остатков сухим травлением. Метод обеспечивает необходимую точность размеров и гладкость стенок волноводной структуры, а полностью медная конструкция позволяет использовать ее в приборах большой мощности.

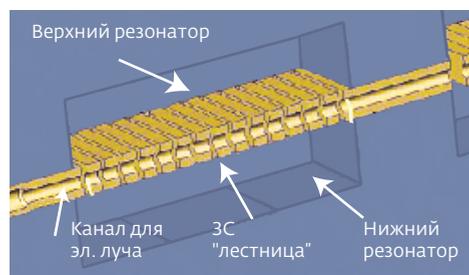
**Таблица 2.** Целевые параметры клистронов с распределенным взаимодействием терагерцевого диапазона

Параметры	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
Частота, ТГц	0,670	0,850	1,030
Непрерывная мощность, Вт	27	25	21
Коэффициент усиления, дБ	23	23	21
КПД, %	0,75	0,50	0,20
Мгновенная полоса, ГГц	15	15	15

Аналогичная технология формирования ЗС разрабатывается и в NRL. Цель работы – создание усилителя с ленточным лучом на 220 ГГц с непрерывной выходной мощностью 50 Вт. ЗС также формируют на полированной медной пластине с помощью маски, УФ-облучателя и фоторезиста SU-8. В качестве ЗС выбрана решетка, взаимодействующая с ленточным лучом (табл.1, рис.6).

В Европе работы в области терагерцевой электроники проводятся по одному из радиоэлектронных проектов Европейского оборонного агентства (EDA): "Терагерцевые технологии для обнаружения скрытого оружия и самодельных взрывных устройств" (Terahertz technologies for detection of hidden weapons and IEDs") [6]. Активно участвуют в создании терагерцевых приборов компания Thales Components & Systems (Франция), Римский университет и др.

Такие компании, как Communications and Power Industries, Science Applications International, Beam-Wave Research и другие, которые имеют богатый опыт разработки клистронов с распределенным взаимодействием на диапазон 220 ГГц, решают задачу создания на их основе приборов на рабочие частоты 670, 850 и 1030 ГГц. В качестве промежуточной замедляющей структуры рассматривается ЗС типа "лестница" (рис.7). Обычный электроискровой метод изготовления ЗС в данном случае не годится, так как он не обеспечивает чистоты внутренней поверхности щелей, необходимой для сведения к минимуму омических потерь ЗС. В качестве технологии создания ЗС типа "лестница" рассматривают УФ- или рентгеновскую литографию и гальваническое формование. При этом потребуются выбор специального металла для гальванического нанесения на полученную с помощью литографии форму. В частности, на меди при термоциклировании могут образовываться зерна, приводящие к выходу прибора



**Рис.7.** Схема клистрона с распределенным взаимодействием терагерцевого диапазона

из строя. Размер канала для электронного луча выбирается так, чтобы он был запредельным для частот ниже 1,38 ТГц, но достаточным для пропускания тока порядка 100 мА и обеспечения тем самым целевых значений усиления и мощности. В результате программы намечено получить параметры, приведенные в табл.2.

Работы по созданию клистронов с распределенным взаимодействием с ленточным лучом в диапазоне 90 ГГц проводит также NRL. В Лаборатории разработана система транспортировки электронного луча (19,5 кВ; 3,5 А) в соленоидальном магнитном поле с значением индукции 8,5 кГс. Специальная электронная пушка формирует ленточный луч со сходимостью около 30. Длина канала для пучка составляет 1,8 см, ширина – 5 мм, высота – 0,4 мм. Предусмотрен изолированный коллектор. Вся конструкция усилителя компактна. Проектировались приборы с помощью программ MICHELLE и MAGIC-3D.

Проблемой создания ленточных пучков занимаются и другие американские компании. Так, CPI и Teledyne Scientific по программе HiFIVE закончили испытания устройства формирования электронного луча (20 кВ; 0,4 А) длиной 25 мм, высотой 0,15 мм с поперечными размерами 25:1 и выходной плотностью тока 750 А/см<sup>2</sup>, предназна-

ченного для приборов миллиметрового и терагерцевого диапазонов. В устройстве использован катод с высокой плотностью тока, разработанный Пекинским НИИ вакуумной электроники и доработанный затем в Калифорнийском университете в Дэвисе.

## РАЗРАБОТКИ ТРАДИЦИОННЫХ ВАКУУМНЫХ СВЧ-ПРИБОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО И ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНОВ

### Клистроны

Один из самых старых классов вакуумных СВЧ-приборов – это клистроны. Тем не менее, они по-прежнему востребованы в радиолокации, системах связи, ускорительной технике, установках нагрева плазмы и продолжают совершенствоваться. Быстро развивается направление многолучевых клистронов и клистронов с ленточным лучом. Клистроны с распределенным взаимодействием, выполняемые по новым технологиям, могут оказаться перспективными для работы в терагерцевом диапазоне.

Лаборатория NRL завершила разработку и представила на конференции IVEC 2010 результаты измерений широкополосного 18-лучевого клистрона S-диапазона (рис.8). Прибор разрабатывался несколько лет и претерпел ряд конструктивных изменений, в результате которых вместо первоначального восьмилучевого четырехрезонаторного клистрона появилось 18-лучевое семирезонаторное устройство. Клистрон рассматривается как возможная замена усилителей магнетронного типа в РЛС корабельной системы AEGIS Weapon System [1, 5]. Импульсная мощность клистрона превышает 500 кВт в полосе 400 МГц (2,9–3,3 ГГц) при коэффициенте заполнения 2,6%. Прибор имеет однокаскадный охлаждаемый водой коллектор. Электронная пушка работает в режиме ограничения пространственным зарядом, а эмиссия с катода контролируется модулирующим анодом, отстоящим на 0,23 см от центра эмиттеров. Напряжение катода равно 42 кВ, общий ток – 41,6 А (2,3 А с одного луча). Для подавления краевой эмиссии в пушке использована катодная маска, постоянное напряжение которой составляет 100 В относительно катода. В случае повышения давления газа в лампе предусмотрена возможность замены электронной пушки.

Хорошо известны многочисленные китайские разработки многолучевых клистронов (МЛК) [5]. На конференции IVEC-2010 Институт электроники Китайской АН (IECAS) представил два типа МЛК С-диапазона – КС 4137 и КС 4148, отличающихся конс-



**Рис.8.** 18-лучевой клистрон S-диапазона лаборатории NRL в испытательном стенде

струкциями выходной секции и секции вывода энергии. Приборы созданы в ходе решения задачи расширения полосы МЛК КС 4092, которая составляла 6,8%, а импульсная мощность – 120 кВт. Значения полосы новых клистронов – 8,1 и 8,5%, мощности – 100 и 160 кВт, КПД – 29 и 32,5%, соответственно. Коэффициент заполнения импульса – 5,5%, средняя частота – 5350 МГц.

Задачу расширения полосы клистронов в IECAS решали не только за счет создания многолучевых конструкций. В мощном клистроне S-диапазона с этой целью применены способ расстройки входных резонаторов, так называемые кластерные резонаторы, а также нагруженная фильтрами выходная секция. В результате получена полоса 12% при импульсной мощности 800 кВт, средней мощности 10 кВт, усилении 42 дБ и КПД 30%.

В другом мощном клистроне S-диапазона института IECAS расширение полосы (до 200 МГц) достигнуто за счет эффекта наложения мод в выходной секции. Импульсная мощность клистрона равна 1,1 МВт, средняя – 22 кВт при КПД более 30% и усилении более 42 дБ.

Институтом IECAS разработаны также несколько клистронов для систем связи, например клистрон S-диапазона с непрерывной мощностью 17 кВт и полосой 4,6%. В нем использован фокусирующий соленоид, жидкостное охлаждение корпуса, выходного окна и коллектора, а также воздушно-принудительное охлаждение пушки. При напряжении луча 17,2 кВ, токе 4 А и плотности тока 1,27 А/см<sup>2</sup> гарантируется срок службы прибора 3000 ч. В X-диапазоне выходная мощность связанного клистрона КХ 4139, работающего при напряжении луча 17,5 кВ и токе 3,25 А, превышает 13,5 кВт. Его мгновенная полоса частот составля-

ет 95 МГц, КПД превышает 25% и усиление – 35дБ.

IECAS также проводит многочисленные исследования в области мощных клистронов с ленточным пучком. Сейчас проходят холодные испытания клистрона X-диапазона с поперечным сечением пучка 50×4 мм, напряжением и током 150 кВ и 100 А, соответственно. Разрабатывается электронно-оптическая система для клистрона W-диапазона с ленточным лучом. Поперечные размеры луча составляют 10×0,4 мм (соотношение 25:1), напряжение – 80 кВ, ток – 4 А, длина трубки дрейфа – 100 мм. Отдельное направление работ IECAS – создание катодов M-типа эллиптической формы для клистронов с ленточным лучом. Большинство разработок IECAS финансируются за счет грантов Национального научного фонда Китая.

Несколько докладов по клистронам на конференции IVES-2010 представила американская компания CPI. Для спутника Juno, планируемого к запуску на орбиту Юпитера в 2016 году, разработан клистрон с непрерывной мощностью до 2 кВт, частотой 34,365 ГГц и полосой более 150 МГц по уровню -1 дБ. Особенность клистрона – фокусировка пучка постоянным магнитом. Магнитное поле в 6 кГс обеспечивает токопрохождение 99,3%. Напряжение и ток пучка равны 10 кВ и 0,9 А, соответственно, усиление – 44 дБ, КПД – 15%.

На импульсном клистроне K<sub>u</sub>-диапазона с трехступенчатым понижающим коллектором компания CPI получила мощность 25 кВт и полосу 100 МГц по уровню -1дБ в диапазоне 16–16,5 ГГц. В приборе использована электронная пушка с сетками и диспенсерным катодом M-типа на напряжение 24 кВ. Коэффициент усиления равен 47 дБ,

общий КПД – 44%, средняя мощность – 6,5 кВт. Длительность импульса – 20 мкс, частота повторения – 1 кГц. Прибор предназначен для подвижных РЛС, в которых требуются высокие значения средней мощности и КПД.

CPI представила также интересные данные по сроку службы более 1000 своих клистронов четырех различных типов, отличающихся уровнем мощности, частотным диапазоном, типом катода и условиями эксплуатации. Статистический анализ проводился более 20 лет и показал, что среднее время наработки на отказ (MTBF) рассматриваемой партии клистронов составляет от 17 до 39 лет при доверительном уровне вероятности 90%.

### Клистроды

Отделение электронных приборов компании L-3 Communications сообщило о разработке широкополосной лампы с индуктивным выходом (клистрода) УВЧ-диапазона для РЛС и связи. Как и все клистроды, лампу отличают высокий КПД и хорошая линейность. В приборе используется модуляция эмиссии электронов на поверхности катода. В отличие от обычного клистрода в выходной зазор введен закороченный на концах отрезок ЗС типа "кольцо-стержень" длиной четыре полуволны, которая резонирует на рабочей частоте. При расчете прибора использована программа MAGIC-2D. Изготовлено два образца прибора с полосой по уровню -3 дБ 26 и 10%, соответственно. Конкретные значения частоты и мощности прибора не указываются.

Компанией Calabazas Creek Research по заказу Министерства энергетики США спроектирован многолучевой клистрод на частоту 350 МГц и непрерывную мощность 200 кВт для ускорительной техники (рис.9). В при-

Таблица 3. Характеристики спутниковых ЛБВ компании L-3 Communications

Диапазон	Мощность, Вт	КПД, %	Число изготовленных приборов	Число устройств на орбите, шт.	Год запуска	Наработка на отказ, млн. ч
L (40–60 ГГц)	80–250	60–70	4	0	2011	0
S (2–4 ГГц)	100–300	62–73	565	330	2000	10,7
C (5,15–5,35 ГГц)	20–120	66–68	524	237	2006	2,6
X (1–2 ГГц)	25–160	63–66	183	115	2004	1,8
Ku (11–18 ГГц)	30–155	60–70	13-14	449	2006	2,7
K (18–27 ГГц)	30–130	58–66	74	0	2010	0
Всего	–	–	2664	1131	–	17,8

боре использованы электронные пушки компании CPI, расположенные по окружности и формирующие семь лучей. Приведены следующие расчетные параметры прибора: напряжение – 30 кВ, полный ток – 10 А, КПД – 70%, усиление – 22 дБ, выходная мощность – 200 кВт. Сборка и испытания лампы были запланированы на лето 2010 года.

Ряд американских компаний проектируют многолучевые клистроны мегаваттного уровня мощности с помощью программ MICHELLE, MAGIC, TESLA и др. Что касается телевизионных клистронов, то их применение особенно расширилось после введения в конструкцию многоступенчатых коллекторов, позволивших увеличить КПД до 50%. Оценки показывают, что срок службы телевизионных клистронов может достигать 30 тыс. ч. Сегодня клистроны востребованы в связи с приходом цифрового телевидения, основные требования к передатчикам которого – экономичность и высокая мощность.

### Лампы бегущей волны

Наиболее востребованный класс вакуумных приборов (ВП) в зарубежной вакуумной электронике. На

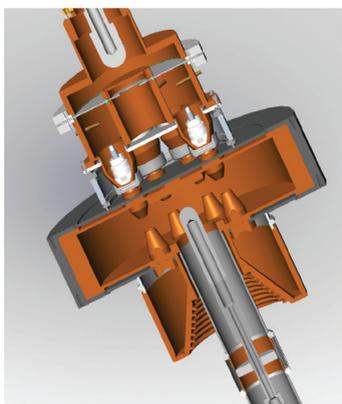


Рис.9. Макет семилучевого клистрода на частоту 350 МГц компаний Calabazas Creek Research и CPI

их долю приходится около 70% продаж ВП, из них более 50% — на долю спиральных ламп. В настоящее время интенсивно строится следующее поколение современных навигационных спутниковых систем – GPS, европейская Galileo, китайская Compass, японская QZSS и индийская IRNSS. Открывающиеся широкие возможности новых применений требуют от систем навигации более высокого разрешения, большей точности, полного охвата всей территории и максимально высокой надежности. В связи с этим возникает необходимость повышения СВЧ-мощности радиочастотного блока на борту спутника и в ряде случаев замены используемых сейчас твердотельных усилителей на ЛБВ.

Последние разработки ЛБВ L-диапазона навигационных систем показали, что их мощность может превышать 200 Вт при КПД > 60%, и они вполне подходят для этой цели. Европейское космическое агентство провело специальные испытания, которые показали, что увеличение размеров и массы передатчика из-за применения ЛБВ может быть полностью компенсировано выигрышем в КПД и расширением полосы, что позволит сократить число ЛБВ, требуемых для резервирования.

Компания L-3 Communications Electron Devices (США) на конференции представила результаты своих разработок спутниковых ЛБВ за последнее десятилетие (табл.3).

Во всех лампах использованы собственные высоконадежные катоды М-типа. Приборы проектировались с помощью программ расчета лаборатории NRL. Больше всего было выпущено ЛБВ S-диапазона (для спутникового радиовещания), C-диапазона (для кабельного телевидения) и  $K_u$ -диапазона (для прямого спутникового телевидения).

Китайский институт IECAS представил результаты разработки спутниковой ЛБВ X-диапазона. Выходная мощность лампы в интервале 8–8,5 ГГц составляет 70 Вт при КПД > 57%. В приборе использован четырехступенчатый коллектор

Таблица 4. Мини-ЛБВ компании Thales

Параметры	TN4443	TN4496EG	TN4428
Диапазон частот, ГГц	4,5–18	6–18	18–40
Выходная мощность, Вт	200	250	80
Входная мощность, дБм	≤ 30	≤ 30	≤ 10
Напряжение спирали, В	5200	5400	9500
Ток пучка, мА	190	230	95
Тип коллектора	Трехступенчатый	Трехступенчатый	Двухступенчатый
КПД, %	25–50	30–50	20–30
Размер, мм	233×46×34	233×62×43	238×41×42
Масса, г	700	1000	630

и фокусировка постоянными периодическими магнитами. Масса его равна 1,2 кг. При нагрузке на катод 0,85 А/см<sup>2</sup> ожидаемый срок службы ЛБВ превышает 10 лет.

Значительно улучшены параметры спиральных ЛБВ наземных станций спутниковой связи, представленных на IVEC 2010. Так, компания L-3 Communications сумела увеличить мощность в импульсном/непрерывном режимах с 500/350 Вт (для ЛБВ 8926НА) до 600/450 Вт (для 8926НС). Новый вариант лампы 8926НС перекрывает полосу частот 30–31 ГГц.

Сходные результаты получены европейской компанией Thales Microwave & Imaging Systems, которая закончила квалификационные испытания на срок службы и воздействие окружающей среды мощной спиральной ЛБВ типа TN4092, предназначенной для наземных станций спутниковой связи. Испытания проводились при непрерывной мощности 500 Вт. В электронной пушке лампы установлен отрицательный (относительно земли) анод, с помощью которого в сочетании с напряжением катода можно оптимизировать электрические и СВЧ-характеристики лампы. Этот же электрод используется для регулировки тока катода во время работы. Приведены следующие характеристики ЛБВ TN4092:

Диапазон частот, ГГц . . . . .	27,5–31
Напряжение спирали, кВ . . . . .	16,5
Ток катода, мА . . . . .	200
Мощность насыщения, импульсная, Вт . . .	540
Усиление в насыщении, дБ . . . . .	48
Непрерывная мощность, Вт . . . . .	350
Ток спирали, мА . . . . .	1
Напряжение коллекторов, % от напряжения катода $V_k$ :	
первого . . . . .	41
второго . . . . .	34

третьего. . . . .	27
четвертого. . . . .	10
КПД в насыщении, %. . . . .	55
Мощность питания, Вт. . . . .	800

Сегодня сформировался отдельный подкласс ламп бегущей волны – мини-ЛБВ для компактных передатчиков систем РЭБ, РЛС и линий передачи данных, перекрывающих широкий спектр частот от 2 до 40 ГГц. Ведущие разработчики спиральных мини-ЛБВ – компании Thales (табл.4), L-3 Communications, e2v Technologies Ltd. (Великобритания) Все они представили на IVEC 2010 свои последние разработки.

Все три модели компании Thales, предназначенные для авиационной и военно-морской аппаратуры, успешно прошли квалификационные испытания на надежность.

Цель ряда разработок компании L-3 Communications – замена крупногабаритных устройств в действующих системах постановки помех на мини-ЛБВ, работающих в диапазоне 6–18 ГГц. Компании удалось уменьшить длину ЛБВ в два раза, ее объем на 20%, мощность питания на 50%, а также увеличить КПД с 27 до 40% за счет применения трехступенчатого коллектора. Разработанная

мини-ЛБВ с непрерывной мощностью 200 Вт значительно улучшает массогабаритные характеристики передатчика и обеспечивает его надежную работу в бортовых условиях и диапазоне температур -54...125°C.

Непрерывная мощность другой мини-ЛБВ  $K_a$ -диапазона (26–40 ГГц) компании составляет 100 Вт в полосе 26–36 ГГц и 125 Вт в полосе 26–32 ГГц. Усиление на малом сигнале в середине полосы равно 38 дБ. Напряжение катода – 8,5 кВ, ток – 140 мА. Четырехступенчатый коллектор с кондуктивным охлаждением позволяет достичь КПД 43% на 30 ГГц. Лампа предназначена для использования в составе мощных модулей МРМ вместе с предварительным линеаризатором, обеспечивающим коэффициент амплитудно-фазового преобразования менее 2 град/дБ при мощности насыщения 125 Вт.

Значительных успехов в разработке сверхширокополосных спиральных мини-ЛБВ для систем электронного подавления добилась компания e2v, которая показала две лампы с достигнутыми целевыми параметрами (табл.5).

Обе лампы, приведенные в табл.5, большей частью выполнены на одинаковых компонентах, включая электронную пушку Пирса с фокусирующим электродом, двухступенчатый коллектор и ППМ фокусировку. Ток пучка составляет ~230 мА при напряжении на катоде 4800 В и плотности тока менее 2 А/см<sup>2</sup>. Проведенные измерения показали полное соответствие характеристик лампы N20181 проектным нормам. Некоторые отклонения частотных характеристик N20180 на краях диапазона предполагается устранить за счет оптимизации устройств связи и коллектора.

В разработках ЛБВ миллиметрового диапазона Китай также демонстрирует заметную активность. На конференции институт IECAS представил ЛБВ  $K_a$ -диапазона мощностью 40 Вт с усилением 38 дБ и КПД 37%. ЛБВ предназначена для мощных СВЧ-модулей МРМ этого диапазона. В лампе использован пятикаскадный коллектор.

Китайская Национальная лаборатория вакуумной электроники сообщила о разработке ЛБВ с выходной мощностью 500 Вт в полосе частот 32–34,5 ГГц с коэффициентом усиления 30–40 дБ. Эта же лаборатория совместно с Пекинским НИИ вакуумной электроники разработала ЛБВ W-диапазона (75–110 ГГц, 3 мм) с непрерывной мощностью 10 Вт, полосой частот 2 ГГц и усилением 25–35 дБ. И в том, и в другом приборе использована ЗС типа "свернутый волновод", рассматриваемая как перспективная для вакуумных приборов миллиметрового и терагерцевого диапазонов.

**Таблица 5.** Целевые параметры мини-ЛБВ компании e2v

Параметры	N20180	N20181
Диапазон частот, ГГц	2–18	4,5–18
Напряжение катода, В	< 5000	< 5000
Выходная мощность, дБм	> 43 (2–4 ГГц) > 50 (5–18 ГГц)	> 50
Мощность питания, Вт	< 540	< 580
Размеры, мм	250×35×35	
Масса, кг	<0,4	

Разработки ЛБВ для мощных модулей проводит и Южно-Корейское агентство военных разработок. Совместно с американскими компаниями им создана радиолокационная спиральная ЛБВ S-диапазона с пятиступенчатым коллектором массой 700 г и размером 210×50×45 мм. Импульсная мощность прибора составляет 1 кВт, коэффициент усиления – 25 дБ, КПД – 50%, коэффициент заполнения импульса – 10%.

Впервые к созданию ЛБВ и мощных модулей W-диапазона на их основе приступила малоизвестная американская компания Inno Sys.

Интерес представляет ЛБВ с катодом на основе углеродных нанотрубок, которая разрабатывается совместно отделением электронных приборов и отделением исследований и технологии компании Thales. В S-диапазоне удалось получить эффект усиления 3 дБ. Большие поперечные скорости электронов и очень малые плотности тока с такого катода пока не позволяют получить лучшие результаты.

В целом мировой рынок СВЧ ЭВП (без учета России) оценивается в 1 млрд. долл. До конца 1980-х годов считалось, что российская вакуумная СВЧ-электроника удерживает паритет с мировой. В дальнейшем этот паритет был нарушен. Зарубежная электроника продолжала развиваться в традиционных направлениях, хотя на рубеже нового столетия это развитие замедлилось, главным образом из-за недостаточного финансирования вакуумных разработок со стороны военного ведомства США. Положение изменилось после того, как за рубежом начались разработки компактных вакуумных приборов крайнего миллиметрового и терагерцевого диапазонов для систем безопасности и специального назначения. Сформировалось и стало динамично развиваться новое направление – интегральная вакуумная СВЧ-микроволновая электроника. Между тем, в России более 40 лет назад в ходе дискуссии о сравнительных перспективах развития вакуумных и полупроводниковых СВЧ-приборов были сформулированы основные принципы ми-

ниатюризации вакуумных СВЧ-приборов малой мощности [7]. На их основе было создано опережающее зарубежный уровень направление миниатюрных вакуумных СВЧ-приборов, сыгравшее в отсутствие в то время полупроводников важную роль в обеспечении оборонных радиосистем гетеродинамиками приборами [8, 9]. Однако в дальнейшем в связи с быстрым ростом полупроводниковой технологии это направление не получило развития. Теперь, когда необходимость построения собственной аппаратуры терагерцевого диапазона очевидна, многое будет зависеть от того, насколько отечественная электровакуумная промышленность сможет использовать приобретенный ранее опыт, соединив его с современными технологиями вакуумной микроэлектроники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Proceedings of the 11<sup>th</sup> IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC 2010.
2. **Викулов И., Кичаева Н.** Вакуумная СВЧ-электроника в США: состояние и тенденции развития. – Электроника: НТБ, 2007, №5, с.66-71.
3. **Викулов И., Кичаева Н.** Американская программа по СВЧ вакуумной электронике HiFIVE. – Электроника: НТБ, 2008, №5, с.70-74.
4. **Rosker M.** Bridging the THz Gap. [www.mtosymposium.org/presentation/03\\_20070303\\_MTO\\_symposium\\_Rosker\\_nobacks.pdf](http://www.mtosymposium.org/presentation/03_20070303_MTO_symposium_Rosker_nobacks.pdf).
5. **Викулов И.** Вакуумная СВЧ-электроника: по материалам конференции IVEC 2009. – Электроника: НТБ, 2010, № 4, с.62-73.
6. **Sieber M., Simon M.** On the Right Wavelength: Microwave and RF Technology for Defence. – Microwave Journal, v.53, №10, p.22-38.
7. **Голант М.Б.** О перспективах развития электронных приборов малой мощности. – Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1966, вып.5, с.95-107.
8. **Голант М.Б., Бобровский Ю.Л.** Минитроны. – М.: Радио и связь, 1983.
9. **Алексеенко А.М., Голант М.Б.** и др. Миниатюризация электровакуумных СВЧ-, КВЧ- и ВЧ-приборов малой мощности. – Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1990, вып.10, с.18-23.