

## ПУТИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ\*

*Н. Д. Девятков*

В Советском Союзе большое внимание уделяется развитию всех отраслей науки, в том числе и электроники сверхвысоких частот (СВЧ). Особенno интенсивное развитие электроники СВЧ началось примерно 20 лет тому назад. Основными предпосылками этого развития были новые требования, выдвинутые в то время молодой и бурно развивающейся областью радиоэлектроники—радиолокацией. Радиолокация в своем развитии не могла ориентироваться только на длинные радиоволны и волны УКВ диапазона. Необходимо было осваивать дециметровый и сантиметровый диапазоны, так как они давали огромный выигрыш в ряде тактических свойств радиолокационной аппаратуры.

В этот период стремления советских ученых и инженеров были направлены на создание таких электронных приборов СВЧ, которые могли бы в дециметровом и сантиметровом диапазонах генерировать значительные мощности как в импульсном, так и в непрерывном режимах, а также приборов для приемных устройств, используемых в качестве гетеродинов, детекторов и усилителей СВЧ колебаний. Успехи в создании приборов СВЧ, достигнутые за последнее десятилетие, послужили основой для развития новых областей радиоэлектроники: радиоспектроскопии, радиоастрономии и радиометеорологии, а также обеспечили условия для дальнейшего прогресса некоторых направлений ядерной физики.

Говоря об интенсивном развитии электроники СВЧ и наиболее эффективных результатах, полученных за последние 10 лет, мы ни в коей мере не хотим умалить те успехи, которые были достигнуты русскими физиками в более ранние периоды времени и которые послужили основной базой для дальнейшего развития электроники СВЧ.

### 1. ИСКРОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Развивая метод Герца, выдающийся русский физик П. Н. Лебедев в 1895 г. провел первые опыты по получению сверхвысокочастотных колебаний. Им была показана возможность получения электромагнитных колебаний с длиной волны 6 мм. Дальнейшие работы по усовершенствованию искрового метода возбуждения колебаний СВЧ в области миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн были проведены в Советском Союзе известным физиком А. А. Глаголовой—Аркадьевой. В 1922 г. ею был разработан массовый излучатель, который давал возможность по-

\* Доклад на второй Всесоюзной конференции Министерства высшего образования СССР по радиоэлектронике.

лучать некогерентные колебания в области длин волн от 10 мк до 350 мк.

В 1924—1927 гг. в Ленинграде физиком М. А. Левитской проводились опыты по усовершенствованию искровых генераторов. Она предложила способ возбуждения искры между элементами решетки, состоящей из малых неподвижных металлических частиц, наклеенных канадским бальзамом на стекло. С таким генератором были получены СВЧ колебания в субмиллиметровой области спектра. В последующие годы работы по искровым генераторам у нас, в Советском Союзе, проводились очень мало. Недостатком искровых генераторов является малая излучаемая мощность СВЧ колебаний и широкий спектр частот. В связи с этим они не нашли широкого применения. Использование их ограничилось только применением при проведении некоторых физических исследований.

## 2. ТРИОДЫ

Наиболее перспективными оказались пути развития электроники СВЧ на основе электронных ламп. Впервые генерирование электромагнитных колебаний СВЧ электронными лампами было получено в Германии Баркгаузеном и Курцем в 1919 году. Несколько позже, но независимо от них, в Ленинграде С. И. Зилинкевич [1] при исследовании усилительных ламп с сетками также обнаружил сверхвысокочастотные колебания. Эти колебания возникали при положительном потенциале на сетке и отрицательном потенциале на аноде лампы. Возникновение колебаний Зилинкевич объяснял так же, как и Баркгаузен и Курц, колебательным движением электронов около положительно заряженной сетки. Такое представление дало возможность С. И. Зилинкевичу, уча цилиндрическую форму электродов, прийти к соотношению того же вида, как Баркгаузен и Курц:

$$\lambda^2 u_g = \text{const.}$$

Работа триодных ламп в схеме тормозящего поля открыла широкие перспективы получения незатухающих колебаний СВЧ. С 1924 года это направление вызвало многочисленные исследования как у нас, так и в других странах.

Первый период исследований характеризовался двумя течениями. Одни исследователи считали, что причиной возникновения колебаний является периодическое движение электронов внутри лампы. Длина волны, по их взглядам, определяется исключительно периодом движения электронов и не зависит ни от какого внешнего контура. Другие исследователи полагали, что длина волны зависит исключительно от колебательной системы, состоящей из электродов лампы и присоединенных к ним проводов ле-херовой системы. Основоположниками этого течения были Жиль и Морель. Советские физики М. Т. Грехова, а также Н. А. Капцов и С. Д. Гвоздовер [2] подвергли тщательному исследованию схемы работы ламп с тормозящим полем. В результате их работ были найдены условия возникновения колебаний как первого вида — чисто электронные, так и второго вида, у которых длина волны почти не зависит от напряжений на сетке и аноде, но меняется при переходе от одной колебательной системы к другой.

Дальнейшие работы М. Т. Греховой [3] и ее сотрудников, про-водившиеся в ВЭИ, дали весьма ценные результаты для практического использования ламп с тормозящим полем. Были созданы лампы с тормозящим полем с внутренними контурами. Показано, что оптимальные условия возбуждения внутреннего контура связа-

ны с временем пролета электронов. Кроме того, был установлен и другой случай колебаний, когда лампа входит в колебательную систему своей междуэлектродной емкостью. М. Т. Грехова назвала эти колебания „колебаниями на емкости“, они же часто называются „анодно-сеточными“ колебаниями. Коллективом сотрудников ВЭИ было создано несколько конструкций ламп, в которых сетка входит в колебательный контур вместе с замкнутым на другом конце отрезком лехеровой системы. Такой вид контура представлял в свое время большой интерес.

Значительные исследования работы ламп с тормозящим полем проводились В. И. Калининым в Саратовском университете. Им был тщательно изучен особый вид колебаний, получивший название „карликовые волны“ [4]. Это колебания внутреннего или внешнего по отношению к лампе контура, который возбуждается таким образом, что в течение времени  $\tau$ , потребного для движения электрона от нити до анода и обратно, контур совершают два, три, четыре и т. д. полных колебаний. Соответственно получаются „карлики“ первого, второго, третьего и т. д. порядков.

В 1933 году В. И. Калининым была предложена так называемая „апериодическая лампа“. Она представляла собой триодную систему лампы с тормозящим полем, имеющую цилиндрические электроды. Образуемая сеткой или анодом колебательная система обладала собственным периодом, сильно отличающимся от периода электронных колебаний, возникающих в лампе [5]. Апериодическая сетка лампы выполнялась в виде „беличьего колеса“. В дальнейшем, по предложению Ю. А. Кацмана, сетка изготавливалась из тонкого молибденового полотна, согнутого в виде цилиндра. Такая лампа позволяла получать плавное изменение генерируемой волны в широких пределах. Апериодические лампы В. И. Калинина давали возможность получить при длинах волн 55–75 см. мощность высокочастотных колебаний не более 0,2 вт. Это были в то время наиболее мощные лампы из всех типов ламп, работающих в схеме тормозящего поля.

К этому же периоду времени (1933–34 гг.) относятся попытки Ю. А. Кацмана и А. А. Шапошникова создать миниатюрные лампы с малыми расстояниями между электродами для работы в схемах с отрицательным потенциалом на сетке. Характерной чертой конструкции предложенной ими лампы было введение между электродами пластинок диэлектрика для фиксации малых междуэлектродных расстояний [6]. В этих лампах были заложены принципы конструирования, которые в дальнейшем развились в конструкции так называемых штабельных ламп.

Желание повысить КПД и получать большую величину мощности, отдаваемой лампой, по сравнению с теми величинами, которые давали лампы с тормозящим полем, заставляло изыскивать наиболее рациональные конструкции триодов с отрицательной сеткой и контурных систем, которые в совокупности с лампой могли бы дать возможность в коротковолновой части дециметрового диапазона получать значительные по величине мощности. Крупный шаг вперед в этом направлении был сделан автором настоящего доклада с его сотрудниками в 1938–39 гг. Были разработаны новые типы триодов и триодных генераторов, обеспечившие почти полное перекрытие диапазона дециметровых волн. В результате проведенных работ методы генерирования метровых волн были распространены и на весь дециметровый диапазон. Мнение о том, что диапазон волн короче 50 см недоступен для триодных генераторов при нормальных режимах работы, было опровергнуто. Разработанные триоды пред-

ставляли собой системы с плоско-параллельными электродами. Расстояния между ними не превышали двух-трех десятых долей миллиметра. Выводы от электродов выполнялись в виде развитых металлических поверхностей, представлявших собой диски или отрезки цилиндров с очень малыми индуктивностями и сопротивлениями. Конструктивно лампы были выполнены таким образом, чтобы они удобно сочленялись с коаксиальными линиями, используемыми в качестве колебательных систем. Наиболее коротковолновые колебания были получены в районе 15 см. Отдаваемая мощность в диапазоне дециметровых волн получалась от десятых долей ватта до 5 вт [7]. На этих же лампах были созданы усилители СВЧ. Анодно-сеточный и сеточно-катодный контуры представляли собой отрезки коаксиальных линий. Входной сигнал подавался в сеточно-катодный контур. Усиленный сигнал выводился из сеточно-анодного контура. Схема усиления на триодах с заземленной сеткой, которая была предложена еще в 1929 г. М. А. Бонч-Бруевичем и не могла быть осуществлена из-за отсутствия подходящих для нее ламп, с лампами, разработанными нами, нашла возможность применения и после этого стала широко использоваться не только в СССР, но и в других странах в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн. Принципы конструирования триодов СВЧ, разработанные нами, послужили основой для создания множества типов триодов СВЧ не только в СССР, но также в Англии и США.

Наиболее совершенными конструкциями, выпускаемыми заводами электровакуумной промышленности и вновь разрабатываемыми в СССР, являются металло-керамические триоды. В настоящее время мы имеем серию промышленных образцов металло-керамических ламп СВЧ для работы в импульсных и непрерывных режимах генерации с мощностями от единиц до десятков ватт в непрерывном режиме и до сотен киловатт в импульсном режиме. Использование новой титано-керамической технологии пайки, основывающейся на применении металлического титана в качестве электродов и выводов в лампах, открывает новые возможности в конструировании миниатюрных металло-керамических триодов для работы в сантиметровом диапазоне. Эта новая технология дает возможность создать лампы для работы в трехсантиметровом диапазоне длин волн, что раньше казалось недостижимым.

Таким образом, из всех известных нам триодных ламп с сетками первенствующее место в технике СВЧ заняли металло-керамические лампы с плоско-параллельными электродами, работающие в схемах с „заземленной сеткой“.

Основные вопросы теории — уравнения и методы анализа, которыми теперь пользуются для теоретического исследования электроники триода при больших амплитудах и больших углах пролета, — были разработаны советскими учеными. В 1936 году Г. А. Гринберг опубликовал [8] выведенные им уравнения, открывающие возможность исследовать электронные процессы в диоде при неограниченной эмиссии катода, больших амплитудах и больших углах пролета. До последнего времени они являются основой всех работ по теоретическому анализу электроники сантиметровых триодов, учитывающих влияние объемного заряда.

В заключение этого раздела следует отметить, что Советскому Союзу принадлежит приоритет создания, осуществления и опубликования как конструкций триодов сантиметрового и дециметрового диапазонов, так и работ, положивших начало теоретическому исследованию электроники этих ламп.

### 3. КЛИСТРОНЫ

Генераторы и усилители клистронного типа за последние два десятилетия получили огромное развитие и стали одними из основных приборов СВЧ, обеспечивающих различные направления в развитии радиотехнической аппаратуры и аппаратуры для современных физических исследований. Первая попытка осуществить лампу, в которой быстрые электроны догоняют медленные<sup>6</sup>, была предпринята в 1932 году Д. А. Рожанским, но эксперимент не дал ожидаемых результатов. Три года спустя А. Н. Арсеньева совместно с немецким физиком Хайль опубликовала статью, дающую теоретическое обоснование принципа действия такой лампы. После этого братьями Вариан в США в 1939 году был впервые создан прямополетный клистрон.

В Советском Союзе в 1939 году также начались работы по созданию прямополетных клистронов. Первые металлические прямополетные клистроны разработаны в 1940 году автором настоящего доклада совместно с сотрудниками, работавшими в руководимой им лаборатории. Они представляли собой двухконтурные системы. Контуры тороидального типа были выполнены из меди. Стенки контуров были гибкие. За счет деформации стенок и изменения сосредоточенной емкости внутри контура (между сетками) можно было изменять собственную частоту контуров и таким образом перестраивать клистрон в довольно широком диапазоне длин волн. Разработанные клистроны работали в 15-сантиметровом диапазоне и отдавали мощность порядка  $20 \pm 100 \text{ вт}$  в непрерывном режиме генерирования. Была обследована возможность получения модуляции частоты генераторного клистрона. В каждый из контуров вводились подвижные металлические элементы. Если их приводить тем или иным способом в движение, то можно было получить частотную модуляцию. Исследование двухконтурного клистрона как усилителя дало возможность убедиться, что он может быть таковым, если сделать больший по протяженности дрейф, чем у генераторного. Коэффициент усиления по мощности был получен не более 8.

К этому же времени относятся первые работы Ю. А. Кацмана и его сотрудников в Ленинградском электротехническом институте по разработке и исследованию прямополетных клистронов в 10-сантиметровом и усилителей клистронного типа в 25-сантиметровом диапазоне длин волн. Первые теоретические работы, посвященные прямополетным клистронам, в СССР были опубликованы В. Я. Савельевым в 1940 году [9] и автором настоящего доклада совместно с Е. Н. Данильцевым в 1942 году [10].

Дальнейшее развитие, после начальных работ, в области прямополетных клистронов было несколько замедлено; только в электротехническом институте проводились некоторые экспериментальные и теоретические работы под руководством Ю. А. Кацмана. В последние годы в связи с бурным развитием ядерной физики и некоторых областей радиоэлектроники проводятся интенсивные работы по созданию прямополетных клистронов как импульсного, так и непрерывного действия. Под руководством С. А. Зусмановского создан усилительный трехконтурный клистрон, имеющий коэффициент усиления порядка 30  $\text{дБ}$  и отдающий мощность в импульсе более 20  $\text{мгвт}$ . По своим параметрам он аналогичен известным нам лучшим образцам, разработанным в США. В связи с необходимостью для целого ряда применений иметь очень высокую стабильность частоты в сантиметровом и дециметровом диапазонах перспективность создания клистронных усили-

телей и умножителей как непрерывного, так и импульсного действия сильно возрастает. Мысли ученых и инженеров как в Советском Союзе, так и за рубежом направлены на решение вопросов повышения мощности, расширения полосы усилительных кластронов, повышения КПД, а также нахождения оптимальных условий умножения частоты различными методами.

#### 4. ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ КЛИСТРОНЫ

Впервые отражательный кластрон был предложен автором настоящего доклада совместно с Е. Н. Данильцевым и И. В. Пискуновым в 1940 году [11]. Он представлял собой металлическую колбу в виде тороидального резонатора, в которую с одной стороны была введена катодная ножка, а с противоположной стороны — вывод отражателя. Резонатор имел гибкие стенки. За счет деформации стенок, производимой специальным устройством, надетым на кластрон, осуществлялась перестройка частоты генерируемых колебаний. Вывод энергии был выполнен в виде индуктивно связанный с контуром металлической петли, переходящей в коаксиальную линию. Несколько позже, независимо от предыдущих авторов, В. Ф. Коваленко была предложена немного видоизмененная конструкция отражательного кластрона, который также настраивался механическим способом за счет деформации крышки металлического контура [12]. В 1941 году В. Ф. Коваленко предложил безынерционный способ модуляции частоты кластрона, основанный на изменении времени пролета электронов в пространстве группировки [13]. Этот способ в дальнейшем получил название „электронной настройки“. Дальнейшее развитие отражательных кластронов как у нас, в Советском Союзе, так и за границей пошло по нескольким направлениям. В коротковолновой части сантиметрового диапазона разрабатывались металлические кластроны с различными видоизменениями контура, представляющего собой либо часть вакуумного металлического баллона, либо конструкцию, независимую и помещенную внутрь объема металлического баллона. В этом случае механическая настройка осуществляется через гибкую торцевую стенку баллона. В длинноволновой части сантиметрового диапазона и в дециметровой области большинство типов отражательных кластронов имеет стеклянную конструкцию. Часть колебательного контура, через которую проходит электронный луч, помещается внутри стеклянного вакуумного баллона, другая часть контура присоединяется снаружи к металлическим дискам, выходящим через стенки баллона. Такая конструкция была предложена советским инженером А. Б. Крайчиком в 1941 году [14]. В это же время в Саратовском университете В. И. Калининым и его сотрудниками был осуществлен широкодиапазонный отражательный кластрон с настраиваемой коаксиальной линией и сетками, выполненными в виде двух концентрических цилиндров. Дальнейшего развития эта конструкция не получила, так как стеклянные кластроны с дисковыми выводами оказались более удобными для постройки широкодиапазонных генераторов. Такие генераторы были разработаны Е. Д. Науменко. Основное применение отражательные кластроны нашли в качестве гетеродинов в супергетеродинных приемниках СВЧ, а также для создания различного рода генераторов в измерительной технике. Обладая электронной настройкой в полосе  $0,5 \div 0,8\%$ , они имеют большие преимущества по сравнению с триодами в схемах с автоподстройкой частоты.

Основное развитие промышленных конструкций отражательных кластронов происходило в послевоенные годы. Автором настоя-

щего доклада совместно с сотрудниками по работе было создано большое количество различных типов отражательных клистронов. Среди них имеются серии металлических и стеклянных клистронов, перекрывающие весь сантиметровый и дециметровый диапазоны волн. В Ленинграде С. М. Никифоровым создан также ряд промышленных типов отражательных клистронов. Основы теории отражательного клистрона были разработаны Я. П. Терлецким и С. Д. Гвоздовером в 1943—1945 гг. [15, 16].

В иностранной патентной и технической литературе отражательный клистрон появился после опубликования его в русской печати. Советскому Союзу принадлежит приоритет изобретения и опубликования как основных принципов работы и конструкции отражательного клистрона, так и приоритет первых работ по созданию теории ламп этого типа.

Дальнейшее развитие отражательных клистронов как у нас, в Советском Союзе, так и за границей идет в направлении увеличения полосы электронной настройки, применения "пассивных" контуров для осуществления перестройки частоты, разработки специальных волноводных выводов энергии и увеличения стабильности генерируемой частоты.

## 5. МАГНЕТРОНЫ

Первые работы по магнетронам в СССР были начаты в 1924 г. А. А. Слуцким и Д. С. Штейнбергом изучались режимы работы диодов, помещенных в магнитное поле, направленное почти параллельно нити катода. При этом были получены высокочастотные колебания в дециметровой области спектра [17, 18]. В 1927 г. ими впервые были получены колебания в сантиметровой части спектра с длиной волны 7,6 см. Теоретическому рассмотрению колебаний, получаемых в неразрезных магнетронах, посвящены работы П. В. Голубкова, А. А. Слуцкого, И. В. Бренева и др. исследователей. В дальнейшем в ряде научно-исследовательских институтов и лабораториях высших учебных заведений развивались работы по изучению возбуждения колебаний в двухразрезных и четырехразрезных магнетронах, а также создавались конструкции для практического их использования. В этом направлении проводились работы А. А. Слуцким и его сотрудниками, а также М. Т. Греховой, М. Л. Слиозбергом, Ю. Н. Шеином, С. А. Зусмановским, В. И. Калининым и еще многими советскими учеными и инженерами. Параллельно с экспериментальными работами разрешались вопросы теории магнетронов. Разрабатывались теория статического режима плоского и цилиндрического магнетронов, теория работы двухразрезного магнетрона, исследовались траектории электронов в магнетроне, условия разогрева катода за счет электронной и ионной бомбардировки и ряд других вопросов.

В течение многих лет исследователи магнетронов не могли дать сколько-нибудь удовлетворительного объяснения работы двухразрезного магнетрона. Впервые строгое теоретическое объяснение было дано в 1935 г. Г. А. Гринбергом и В. С. Лукошковым.

Наиболее интересные результаты по созданию мощных разрезных магнетронов в период до 1938 г. были получены в Ленинграде на заводе "Светлана" и в физико-техническом институте АН УССР в г. Харькове.

С. А. Зусмановским совместно с его сотрудниками в 1935 г. был создан двухразрезной магнетрон непрерывного генерирования, который мог плавно перестраиваться в диапазоне длин волн от 60 до 80 см и отдавал при этом 16 квт колебательной мощности [19].

Другой магнетрон также двухразрезного типа при длине волны 15 см отдавал мощность в один киловатт. Конструкции магнетронов были разборные и работали при непрерывной откачке.

В 1937 г. А. А. Слуцкин, С. Я. Брауде и И. Д. Трутень разработали конструкцию цельнометаллического магнетрона, отдававшего мощность 17 квт при длине волны 80 см в непрерывном режиме [20]. К этому же периоду относятся работы Ю. Н. Шеина по разработке мощных импульсных магнетронов, а также работы автора настоящего доклада и Г. А. Разоренова по созданию мощных магнетронов разборного типа с четырехразрезными анодами, работавшими в дециметровом диапазоне длин волн.

Дальнейший этап в развитии магнетронов характеризуется появлением многорезонаторного магнетрона, который прочно завоевал себе место на многие годы как наиболее экономичный и мощный генератор СВЧ.

Идея многоконтурной (многорезонаторной) колебательной системы была предложена М. А. Бонч-Бруевичем еще в 1929 г. Эта идея создания колебательного контура, состоящего из ряда отдельных контуров, использования его в режиме колебаний π-вида и, кроме того, применение такого контура для увеличения мощности, как это предлагал М. А. Бонч-Бруевич, и послужили основой создания многорезонаторных магнетронов.

В 1936—1937 годах под руководством М. А. Бонч-Бруевича Н. Ф. Алексеев и Д. Е. Маляров вели разработку магнетронов. Ими была разработана конструкция многорезонаторного анодного блока, изготовленного из медной болванки, а затем и создан первый многорезонаторный магнетрон, который явился основой дальнейшего развития современных многорезонаторных магнетронов не только в Советском Союзе, но и в других странах.

Н. Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым до 1941 г. было создано несколько конструкций магнетронов, имевших анодные блоки с числом резонаторов от 4 до 8. Длины волн, получаемые от магнетронов, лежали в пределах от 2,6 до 10 см. Наилучший результат по мощности был получен порядка 300 вт при длине волны 9 см в непрерывном режиме колебаний [21].

В 1939 г. на несколько видоизмененную конструкцию многорезонаторного магнетрона получил авторское свидетельство В. П. Илясов. Основным отличием его конструкции было увеличенное число резонаторов (до 12), кроме того, предусматривалось, что „пазы в аноде образуют колебательные контуры с распределенными или сосредоточенными постоянными“, предлагалось применять полый цилиндрический катод большого диаметра и были предложены металлические дужки (кольца) на торцевых поверхностях анодного блока. Присоединялись они электрически к концам колебательных контуров, имевших одинаковые фазы колебаний. Аналогичные устройства в современных магнетронах называются „связками“. Таким образом, приоритет изобретения основных элементов конструкции современного многорезонаторного магнетрона принадлежит В. П. Илясову [22].

Во время второй мировой войны во всех технически передовых странах интенсивно велись разработки магнетронов. На смену „разрезных“ магнетронов пришли различные конструкции многорезонаторных систем. В связи с развитием импульсной радиолокации повышались требования к величинам мощностей в импульсе в сантиметровом диапазоне волн. Многорезонаторный магнетрон стал основным мощным импульсным генератором, на котором базировались разработки радиолокационных передатчиков. Дальнейший прогресс магнетронов в послевоенные годы неразрывно свя-

зан с совершенствованием систем радиолокационных устройств. Нет возможности останавливаться на всем многообразии конструкций, типов и направлений, которые прошли за последнее десятилетие. Следует только отметить, что основные направления развития многорезонаторных магнетронов как у нас в СССР, так и в других странах преследовали следующее: увеличение КПД, увеличение отдаваемой мощности, укорочение длины волны, увеличение стабильности частоты и разработку методов управления генерируемой частотой. Эти же общие направления, как нам представляется, будут и программой дальнейшего развития многорезонаторных магнетронов в ближайшие годы.

Кроме тех классов электронных приборов СВЧ, пути развития которых были изложены в настоящем докладе, за последние годы появился еще целый ряд новых типов приборов СВЧ, действие которых основано на длительном взаимодействии электронного потока с высокочастотным полем замедленной электромагнитной волны. К таким приборам относятся лампы бегущей волны, лампы обратной волны, магнетронные усилители, кармotronы, амплитроны и другие приборы. Все эти приборы имеют пока еще очень короткую историю своего развития. Но темп развития этих новых классов приборов очень быстрый. Объясняется это тем, что их применение создает совершенно новый качественный скачок в параметрах и возможностях радиоэлектронной аппаратуры. Сами же электронные приборы требуют еще большой работы по их усовершенствованию. Входные лампы бегущей волны требуют значительного улучшения шумфактора, уменьшения весов и габаритов. Лампы обратной волны обладают еще недостаточно высоким электронным КПД. Эффективность использования электронного потока в пространстве взаимодействия должна быть значительно повышена. Усилиительные приборы СВЧ средней и большой мощности не обладают достаточно широкой полосой усиления. Вопросы теории этих новых направлений в СВЧ электронике также требуют большого внимания физиков-теоретиков для своего развития. От удачного разрешения вопросов создания замедляющих и резонансных систем, обеспечивающих высокую эффективность взаимодействия поля с электронным потоком, а также вопросов создания и формирования электронных потоков больших плотностей зависит дальнейшее развитие ряда новых классов электронных приборов СВЧ.

В этих направлениях ведутся изыскания советскими учеными. Значительный интерес представляют идеи, предложенные А. П. Федосеевым, заключающиеся в том, чтобы строить мощные самовозбуждающиеся генераторы СВЧ с резонансными системами, имеющими размеры поперек электронного потока, в несколько раз превышающими длину волны колебаний. В ранее известных системах эта длина не превышает  $0,5 \lambda$ . Предлагаемые генераторы с такими системами по конструкции и свойствам существенно отличаются от обычных [23]. Они открывают путь к созданию очень мощных генераторов СВЧ.

Остановимся еще на одном очень удачно разрешенном вопросе создания электроннооптических систем для ЛБВ. Как известно, обычным способом удержания электронного луча нужной формы при прохождении его через замедляющую систему ЛБВ является создание однородного продольного магнитного поля. Для этого требуется применять либо соленоиды, либо постоянные магниты. Так как длины ЛБВ обычно достаточно большие и применя-

емые магнитные поля не менее 600 э, то вес соленоидов и постоянных магнитов получается очень солидный—порядка 10—25 кг. Большой вес и наличие дополнительного питания для соленоидов во многих случаях создают большие неудобства для эксплуатации ЛБВ. В Институте радиотехники и электроники АН СССР З. С. Черновым были предложены новые системы электростатической фокусировки, которые значительно уменьшили вес и улучшили ряд параметров усилительных ламп бегущей волны. На основе этих систем был разработан так называемый „спиратрон“, в котором применена центробежная электростатическая фокусировка [24]. Электронный поток в спиратроне вводится под углом к оси в пространство между двумя коаксиальными цилиндрами, один из которых (внешний) представляет собой замедляющую систему. Между цилиндрами приложено напряжение, причем внутренний цилиндр имеет более высокий потенциал. В такой системе электроны при условии уравновешивания центробежной силы силой электростатического поля двигаются вдоль системы по спиральным траекториям. Таким образом создаются условия для прохождения электронного луча вдоль всей лампы вблизи от замедляющей системы без применения магнитного поля. Применение центробежной электростатической фокусировки открывает большие возможности по усовершенствованию ламп бегущей волны.

Заканчивая доклад, должен сказать, что изложенное мной далеко неполно характеризует все пути развития электроники СВЧ в СССР. Я не мог остановиться на целом ряде приборов и направлений, так как это потребовало бы слишком большого времени. Я также не имел возможности назвать имена многих советских ученых и инженеров, которые своей работой внесли большой вклад в дело развития электроники СВЧ в Советском Союзе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Зилитинкевич, Телег. и Телеф. без проводов, 18 (1923)
2. М. Т. Грехова, Zs. f. Phys., 35 (1925).
3. Н. А. Капцов и С. Д. Гвоздовер, ВЭТЭ, 5 (1928); Zs. f. Phys., 45 (1927).
4. М. Т. Грехова, ВЭТЭ, 312—314 (1928).
5. В. И. Калинин, Журн. Русск. Физико-химич. общества, 41, 131—142 (1929).
6. В. И. Калинин, ЖТФ, 3, 2—3 (1933).
7. Ю. А. Кацман, А. А. Шапошников, Авт. свид. № 39876 (1934).
8. Н. Д. Девятков, Е. Н. Данильцев, ИЭСТ, 2, (1940).
9. Н. Д. Девятков, М. Д. Гуревич, В. К. Хоклов, ЖТФ, 9, 8 (1941).
10. Н. Д. Девятков, Е. Н. Данильцев, ЖТФ, 6 (1936).
11. Н. Д. Девятков, Е. Н. Данильцев, И. В. Пискунов, Авт. свид. № 60980 (1940).
12. В. Ф. Коваленко, Авт. свид. № 59218 (1940).
13. В. Ф. Коваленко, Авт. свид. № 61694 (1941).
14. А. Б. Крайчик, Авт. свид. № 61798 (1941).
15. Я. П. Терлецкий, Ученые записки МГУ, 1945.
16. С. Д. Гвоздовер, ЖЭТФ, 15, 9 (1945).
17. А. А. Слуцкий, Д. С. Штейнберг, Журн. Русск. физико-химич. общества, 58 (1926).
18. А. А. Слуцкий, Д. С. Штейнберг, Укр. физ. записки, 58, 1926.
19. С. А. Зусмановский, Диссертация (ВЭИ).
20. А. А. Слуцкий, С. Я. Брауде, И. Д. Трутень, Радиотехника, 1, 9 (1946).
21. Н. Ф. Алексеев, Д. Е. Малюров, ЖТФ, 10, 15 (1940).
22. В. П. Илясов, Авт. свид. № 95819 (1939).
23. А. П. Федосеев, Труды НИИ МРПП, 5 (34).
24. З. С. Чернов, Радиотехника и электроника, 1, 2 (1956).

Поступила в редакцию  
30 ноября 1957 г.