

УДК 621.38

М.И. КОНЧА,
К.С. ЛОПАТКИН, кандидат
технических наук
Ю.Н. САВЕЛЬЕВ, кандидат
технических наук, старший
научный сотрудник

ОСНОВНЫЕ ВЕХИ РАЗВИТИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ

В статье рассматриваются основные этапы развития СВЧ электроники от технологии создания СВЧ электровакуумных приборов, до современных технологий создания СВЧ многофункциональных и комплексированных твердотельных модулей. Показана динамика и перспективы развития отечественных СВЧ изделий.

Ключевые слова: средства радиоэлектронного вооружения; приборы сверхвысокочастотные; радиолокация.

Среди широкой номенклатуры изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), применяемой в образцах средств радиоэлектронного вооружения (РЭСВ), важное место в обеспечении их эффективной работы занимают приборы сверхвысокочастотные (СВЧ). Уровень их функциональных параметров, показатели надежности и качества в значительной мере определяют эксплуатационные характеристики РЭСВ, их возможность своевременно и эффективно выполнять стоящие перед ними боевые задачи. Опыт показал, что применение РЭСВ значительно повышает боевую эффективность всех видов Вооруженных Сил (ВС) и родов войск.

Первые работы в области радиолокации проводились в СССР в начале 1930-х гг. рядом групп исследователей под руководством Ю.К. Коровина, П.К. Ощепкова, Б.К. Шембея и др. [1]. Эти работы однозначно показали возможность решения проблем обнаружения самолетов и сопровождения их радиотехническими средствами на значительных расстояниях.

Начатые в 1935 году исследования под руководством Ю.Б. Кобзарева, привели к созданию импульсных наземных радиолокаторов дальнего обнаружения самолетов.

Радиосвязь и радиолокация очень активно развивались во время Великой Отечественной войны. Это объяснялось их значительным влиянием на результаты оборонительных и наступательных операций. Использование радиолокационных средств позволило существенно изменить тактику войны в воздухе, на море и в некоторой мере на суше.

Быстрому развитию радиосвязи и радиолокации во многом способствовали достижения в области работ по созданию специальных электровакуумных приборов (ЭВП) для усиления и преобразования СВЧ сигналов – магнетронов, клистронов, мощных и сверхмощных генераторных, модуляторных ламп и импульсных тиратронов.

В годы Великой Отечественной войны совершенствовались существующие и разрабатывались новые радиостанции (РБМ, 9Р, ЮР, РАФ и др.), появились первые радиолокационные станции (РУС-1, РУС-2, П-3, СОН-2а) [2].

Для координации в развитии радиоэлектронных средств вооружения и изделий электронной техники, в том числе приборов СВЧ электроники, специальным постановлением в 1943 году был создан Совет по радиолокации при Государственном Комитете Оборона.

Перед Советом по радиолокации в качестве ближайших были поставлены задачи по обеспечению улучшения качества и увеличению объемов серийного производства выпускаемых промышленностью радиолокаторов [3]:

- обнаружения, опознавания самолетов и наведения на них истребительной авиации в системе противовоздушной обороны (ПВО) – «Пегматит-3» и «Редут» с высотной приставкой;
- станции орудийной наводки СОН-2 для обеспечения стрельбы зенитных дивизионов в системе ПВО;
- самолетных радиолокационных установок наведения для двухмоторных самолетов «Гнейс-2»;
- радиолокационных приборов опознавания самолетов и кораблей «СЧ».

Начавшееся в послевоенные годы оснащение ВС СССР ракетно-ядерным оружием с активным развитием новых средств вооруженной борьбы обусловило повышение требований к точности, эффективности действия и надежности систем управления войсками и оружием. В то же время существенное усложнение радиоэлектронной аппаратуры, насыщение ее комплектующими, включая ЭВП, привели к сниже-

нию ее надежности в реальных условиях эксплуатации и боевого применения. Возникавшие проблемы успешно решались научными и техническими специалистами.

Номенклатура ЭВП СВЧ, применявшихся и разрабатываемых для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) средств вооружения и военной техники, к этому времени была достаточно широкой, диапазон рабочих частот достигал тысяч мегагерц, а уровни генерируемых колебаний – десятков мегаватт. ЭВП СВЧ применялись в самых различных режимах для генерирования, преобразования и усиления электрических сигналов. Практически ежегодно, с расширением функций радиоэлектронных средств, разрабатывались ЭВП с новыми функциональными возможностями.

Для целенаправленного и комплексного выполнения работ по развитию военной электроники (в том числе ЭВП СВЧ) в 1951 году было принято решение о создании в Минобороны специальной научно-испытательной организации – Центральной лаборатории электровакуумных приборов Минобороны СССР (ЦЛЭП).

Сотрудники ЦЛЭП получили возможность осуществлять контроль ведения разработок в промышленности, участвовали в сопровождении опытной эксплуатации таких систем как СНАР-1, СОН-4, СОН-9. С 1954 года начались работы по созданию первых полупроводниковых диодов СВЧ. Уже к середине 1950-х гг. стало понятно, что объем проводимых ЦЛЭП работ и их направленность (электровакуумные приборы) не в полной мере обеспечивают потребности вооруженных сил. Для дальнейшего развития систем вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), обеспечения их надежной и эффективной работы, отвечающей требованиям времени, потребовалась разработка новых, перспективных радиоэлектронных средств и элементной базы для них. Отдельную роль на данном этапе развития ЭВП СВЧ сыграл, образованный в 1955 году на базе ЦЛЭП 22 Центральный научно-исследовательский испытательный институт (22 ЦНИИИ) Минобороны СССР, решавший актуальные научно-технические межвидовые и межотраслевые проблемы развития военной электроники и электротехники [4].

Требования к элементной базе с каждым годом возрастали, особенно к СВЧ изделиям, являющимся системообразующими изделиями ЭКБ, приемопередающих радиоэлектронных средств вооружения. В промышленности стал внедряться модульный принцип построения

блоков СВЧ. Построение аппаратуры на модулях позволило резко повысить КПД систем при снижении их веса и полностью реализовать приемо-передающие тракты на основе твердотельных приборов. За участие в работах по созданию нового поколения электронных модулей коллектив работников промышленности был удостоен Государственной премии СССР.

Развитие средств ВВСТ осуществлялось по мере внедрения в РЭСВ новых перспективных изделий СВЧ, отвечающих высоким эксплуатационным требованиям. К значимым работам того времени можно отнести исследования по обеспечению надежной работы комплексированных изделий СВЧ в передатчике радиолокационного прицела истребителей МиГ-29 и Су-27 [5].

Активными годами по разработке, производству и внедрению в военную приемопередающую аппаратуру СВЧ изделий были 1960-1970-е гг. В эти годы были разработаны и внедрены в эксплуатацию такие изделия, как коаксиальные магнетроны, ферритовые вентили и циркуляторы, амплитроны, мощные лампы бегущей волны (ЛБВ), усилительные клистроны, мощные лампы обратной волны, полупроводниковые и ферритовые фазовращатели и аттенюаторы, генераторно-усилительные цепочки с выходными каскадами на амплитронах, пролетных клистронах и ЛБВ, гибридные защитные устройства, гироклистроны, многорежимные и многолучевые высокопотенциальные ЭВП СВЧ и комплексированные изделия СВЧ на их основе, полупроводниковые модули СВЧ на дискретных элементах и др. В головки самонаведения ракет внедрялись малогабаритные ЭВП СВЧ с мгновенным временем готовности, в спутниковые системы связи внедрялись сверхдолговечные ЛБВ. В те же годы актуальными стали задачи по электромагнитной совместимости (ЭМС) СВЧ изделий в составе радиоэлектронных комплексов, нормирование характеристик ЭМС изделий СВЧ, формировался комплекс государственных военных стандартов (КГВС) в области ЭМС РЭС в части требований и характеристик изделий СВЧ. Был разработан комплекс Руководств по порядку хранения и применения изделий СВЧ, разработаны методологии и Положения о проведении стыковочных работ изделий СВЧ в составе РЭА. В 1975 году были разработаны и внедрены общие технические условия (ОТУ) на новые изделия СВЧ. В 1979 году – ОТУ на модули СВЧ 1-го и 2-го уровней.

По результатам оценки состояния и развития отечественных и зарубежных СВЧ изделий формировались предложения по годовым и перспективным планам разработки новых типов и групп СВЧ изделий. На основе таких предложений были разработаны сверхширокополосные ЭВП СВЧ и приборы твердотельной СВЧ электроники для систем радиоэлектронного подавления, сложные многофункциональные модули и комплексированные изделия СВЧ, монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ, функциональные submodule, узлы и МИС СВЧ для твердотельных активных фазированных антенных решеток (АФАР) в X, L, S – диапазонах частот, циклотронные защищенные комплексированные устройства, мощные малогабаритные вакуумно-твердотельные комплексированные изделия СВЧ с удельной плотностью мощности свыше 250 Вт/дм³.

Большой объем работ проводился не только в части развития номенклатуры СВЧ изделий, но и в части развития нормативно-технического обеспечения. В 1990-е гг. были разработаны нормативные документы по обеспечению и контролю качества и правилам приемки изделий СВЧ единичного, мелкосерийного и прерывистого производства, о порядке проведения работ и работы по замене маломощных ЛБВ в приемных трактах, находящихся в эксплуатации наземных РЛС, на твердотельные маломощные СВЧ усилители, о порядке поставок на экспорт СВЧ изделий электронной техники и электротехники военного и двойного назначения, руководящий документ, устанавливающий технические требования к реставрации (регенерации) приборов и узлов ЭВП СВЧ¹, нормативный документ по реставрации мощных ЭВП СВЧ в обеспечение систем 5Н20, 19Ж6 (35Д6), 64Н6, 55Ж6.

Значимыми результатами работ по формализации требований в части обращения с СВЧ изделиями стали ГОСТ РВ 5963-003 «Совместимость технических средств электромагнитная. Модули СВЧ приемных устройств РЭС. Параметры и характеристики. Методы измерения», методология оценки и прогнозирования технического состояния ЭВП СВЧ с истекшими сроками хранения, методология индивидуальной оценки качества изготовления сложных многофункциональных модулей СВЧ и комплексированных изделий СВЧ. В рамках развития КГВС «Климат-7» были разработаны ОТУ.

¹ РД В 22.12.200-2002 «Приборы электровакуумные СВЧ. Реставрация (регенерация) приборов и узлов. Диагностика состояния, обеспечение и контроль качества. Технические требования».

Результатом исследований в части развития технологии создания приборов усиления, преобразования и генерации СВЧ сигналов стала разработка КЦП «Электроника СВЧ-2015». Только в интересах предприятий Роскосмоса в рамках выполнения комплексных целевых программ (КЦП) и годовых программ были запланированы и выполнены более 15 опытно-конструкторских работ по созданию СВЧ изделий. Были разработаны радиационно-стойкие СВЧ усилители, МИС СВЧ, фазовращатели, фильтры, ЭВП СВЧ, а именно: усилитель мощности с выходной мощностью до 10 Вт в диапазоне частот 1-2 ГГц, маломощный СВЧ усилитель для диапазона 1-2 ГГц, МИС СВЧ дискретных шестиразрядных фазовращателей, высоконадежная ЛБВ с коэффициентом полезного действия 50-55% в диапазоне до 20 ГГц с выходной мощностью 75 Вт, высокостабильный маломощный сверхвысокочастотный пьезогенератор на частоты 10-25 ГГц и др. [6]. Перечисленные изделия разрабатывались в обеспечение таких образцов, как Система 14КО32, космические аппараты «Персона», «Меридиан», «Лиана», «Гарпун», «ГЛАНАСС-К», «Союз» и др. В рамках выполнения КЦП разрабатывались СВЧ изделия с параметрами, не уступающими лучшим зарубежным аналогам.

Создание СВЧ изделий осуществлялось в условиях развития соответствующей нормативной базы. Необходимая нормативная документация разрабатывалась при активном участии специалистов института. В частности, сотрудниками 22 ЦНИИИ (в последующем – филиала 46 ЦНИИ) Минобороны России и открытым акционерным обществом «Российский научно-исследовательский институт «Электронстандарт» с участием специалистов предприятий электронной промышленности в рамках развития КГВС «Климат-7» были разработаны групповые технические условия ГОСТ РВ 5960-002, ГОСТ РВ 5963-004, ГОСТ РВ 5963-005, ГОСТ РВ 5999-003 на СВЧ изделия, которые применяются совместно с ОТУ (ГОСТ РВ 5900-004-2016). Стандарты распространяются на вновь разрабатываемые и серийно выпускаемые электровакуумные приборы сверхвысокой частоты и защитные устройства сверхвысокой частоты, модули сверхвысокой частоты, ферритовые приборы сверхвысокой частоты, комплексированные изделия сверхвысокой частоты категорий качества «ВП», «ОС», «ОСМ» и «ОСД», предназначенные для использования в радиоэлектронной аппаратуре военного назначения всех климатических исполнений по ГОСТ РВ 20.39.304.

Развитие изделий СВЧ для РЭА ВВСТ осуществляется при военно-техническом сопровождении 46 ЦНИИ Минобороны России, которое заключается в анализе перечня планируемых к постановке ОКР по разработке изделий СВЧ, в части оценки актуальности и соответствия плановым заданиям государственной программы вооружения и государственного оборонного заказа, рассмотрении проектов требований к качественным, функциональным и техническим характеристикам изделий СВЧ на ОКР по разработке указанных изделий СВЧ, в части оценки обоснованности задания и полноты требований по стойкости к внешним воздействующим факторам и требований надежности с учетом требований к РЭА ВВСТ.

На сегодняшний день основными направлениями развития и совершенствования изделий СВЧ, в первую очередь, является расширение освоения мм-диапазона длин волн, путем создания широкой номенклатуры изделий с уровнем выходной мощности ЭВП до десятков МВт, увеличение выходной мощности других групп приборов, увеличение долговременной стабильности частоты задающих (гетеродинных) генераторов до 10^{-8} .

Следует отметить, что сейчас очень активно развиваются твердотельные СВЧ модули. В них интегрируются достижения, полученные при разработках СВЧ полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных микросхем. Расширение функциональных возможностей модулей, снижение их масса-габаритных показателей, повышение их эксплуатационной надежности – генеральная линия развития СВЧ модулей. На их основе строятся АФАР таких образцов вооружения, как ЗРК С-500, СУ-75. Уровень параметров СВЧ ПП определяется достижениями в области технологии создания полупроводниковых структур с малыми топологическими размерами, поэтому в части твердотельных СВЧ приборов до 2030 года планируется достижение производства:

- структур ВiCMOS HBT, HEMT, pHEMT с топологической нормой 65-45 нм, их гетерогенная интеграция на пластине – GaN on Si, SiGe, GaAs;
- изделий электронной компонентной базы терагерцового диапазона частот на основе InP и других материалов для радаров, видеосистем, сверхмощного вычислительного оборудования и иных применений².

² Распоряжение Правительства РФ от 17 января 2020 года №20-р «О Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 года и плане мероприятий по ее реализации».

Для сокращения отставания от ведущих зарубежных компаний критически важно освоение указанных выше технологий. Свойства GaN, SiGe позволяют создавать изделия с рекордными напряжениями пробоя и широкой полосой рабочих частот. Устройства на основе GaN, SiGe имеют меньшие массо-габаритные размеры, чем устройства, изготавливаемые по ранее освоенным технологиям, что позволяет физически уменьшить конструкцию блоков РЭА в целом.

Достигнутый на сегодня и планируемый на ближайшие 8-10 лет уровень функциональных параметров изделий вакуумной и полупроводниковой электроники обеспечил и обеспечит их эффективное использование в перспективных образцах РЭСВ в широком диапазоне рабочих частот аппаратуры (см. рисунок 1). По мере развития технического уровня изделий СВЧ будет осуществляться повышение технического уровня образцов военной РЭА.

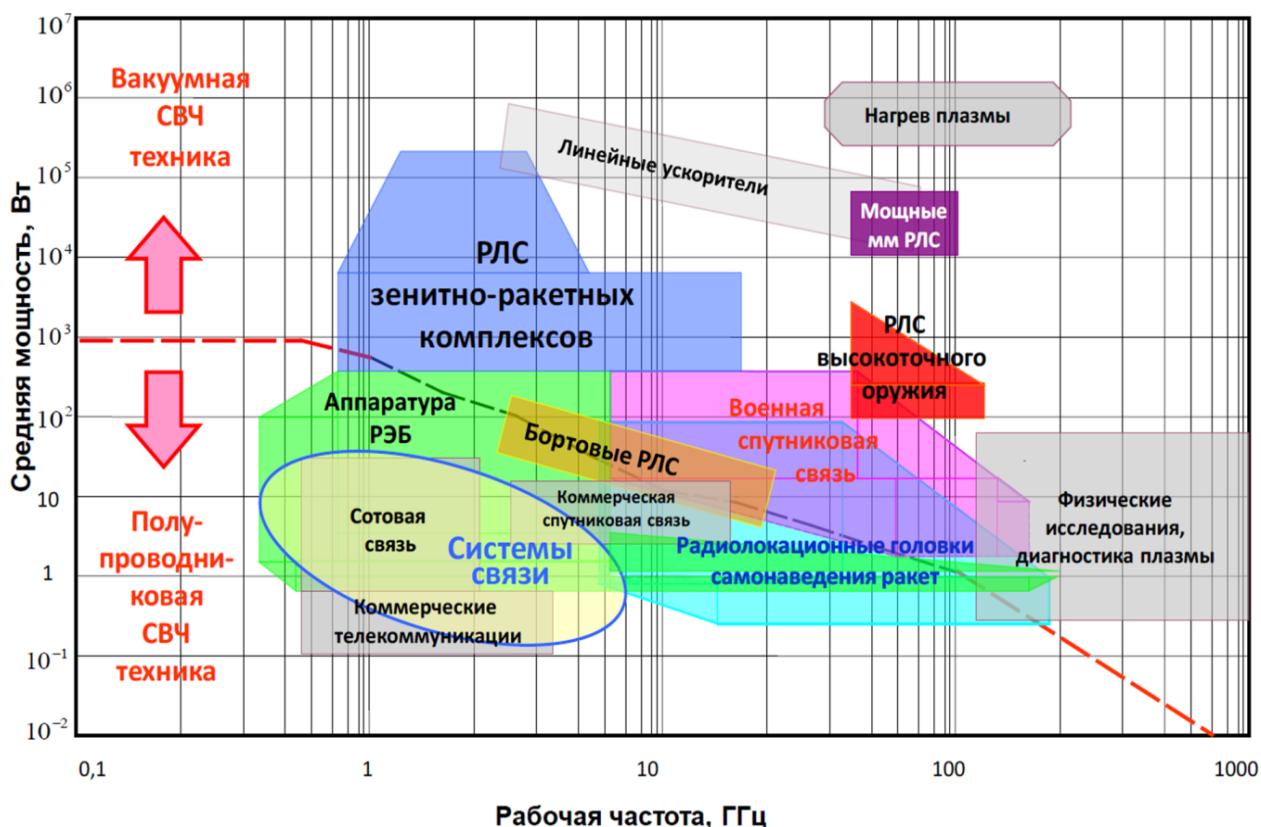


Рисунок 1 – Области применения изделий СВЧ электроники

Таким образом, СВЧ электронные приборы были и остаются одной из важнейших групп системообразующей ЭКБ, которая в значительной мере определяет эксплуатационные характеристики РЭСВ, их возможность своевременно, надежно и эффективно выполнять стоящие перед ними боевые задачи.

Список использованных источников

1. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. М.: Советское радио, 1961. – 384 с.
2. Климович Е.А., Гладков А.А. Из истории отечественной радиолокации. Первые отечественные РЛС дальнего обнаружения // Техника и вооружение. 2008. №2. – С. 34-43.
3. Васина Т.Г. ВПК СССР: почувствуй гордость за страну. М.: Центрполиграф, 2018. – 350 с.
4. Заярнюк В.В., Матюхин Д.В., Николаев В.Н., Соломенин Е.А. Управление развитием электронной компонентной базы военного назначения // Вооружение и экономика. 2012. №4(20). – С. 56-71.
5. Вместе с развитием электроники: исторический очерк / Ред. колл.: А.В. Баюков, М.А. Бедревский, А.А. Борисов, Е.В. Истомин, М.И. Критенко, В.М. Ломакин, В.Н. Николаев, Ю.Н. Степанов. Мытищи: 22 ЦНИИИ Минобороны России, 2005. – С. 23-35.
6. Щербаков С.В. Развитие СВЧ электроники в рамках реализации государственных программ // Сб. статей VI Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» в СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. Т.1. – С.15-23.