

Развитие СВЧ электроники в рамках реализации государственных программ

Показаны основные направления развития отечественной СВЧ электроники в рамках реализации мероприятий федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы и других программ, заказчиками и координаторами которых являются федеральные органы исполнительной власти. Проведен комплексный анализ развития отечественного СВЧ приборостроения, развития СВЧ технологий и технологической базы предприятий отрасли, электронного СВЧ материаловедения, испытательной и метрологической базы.

Ключевые слова: сверхвысокочастотная электроника (СВЧ электроника), федеральная целевая программа (ФЦП), государственная программа, научно-исследовательская работа (НИР), опытно-конструкторская работа (ОКР), промышленная технология, монолитная интегральная сверхвысокочастотная схема (МИС СВЧ), арсенид галлия, нитрид галлия, алмаз.

В нашей стране, как и за рубежом, технологии сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники отнесены к критическим, существенным образом, влияющим на облик и технические характеристики радиоэлектронных устройств различного функционального назначения, роль которых в повседневной деятельности человека постоянно возрастает. Радиолокационное, радионавигационное и радиосвязное оборудование являются неотъемлемыми атрибутами всех видов космической, авиационной и морской техники, в промышленности все более широко используется СВЧ оборудование для спекания материалов, напыления и нанесения различных видов покрытий, в медицине при комплексном лечении различных заболеваний используются СВЧ установки для терапии и гипертермии, новые виды беспроводной связи и телекоммуникаций развиваются благодаря новым технологическим решениям в СВЧ электронике и пр.

В период после распада СССР на полтора десятилетия были практически заморожены исследования и разработки в различных областях науки и техники, в том числе в области СВЧ электроники, что не могло не сказаться на производственно-технологическом и кадровом облике отрасли.

Отправной точкой современного развития СВЧ отрасли стали мероприятия, запланированные и реализованные федеральными органами исполнительной власти России в рамках ФЦП «Национальная технологическая база на 2007-2011 годы» [1] и ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008 - 2015 годы [2]. В настоящее время развитие СВЧ электроники планируется и осуществляется в рамках государственных и федеральных целевых программ, основные сведения о которых приведены в Таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Наименование программы	Заказчик и координатор программы	Сроки реализации
1	Государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»	Минпромторг России	2012-2020 гг.
2	Государственная программа «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013 - 2025 годы»	Минпромторг России	2013-2025 гг.
3	Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»	Минобрнауки России	2014-2020 гг.

Кроме того, исследования и разработки в области СВЧ электроники ведутся за счет средств различных фондов (Фонд перспективных исследований, «Сколково» и др.).

В реализации мероприятий этих программ участвуют предприятия и организации различных форм собственности и ведомственной подчиненности, в том числе предприятия и организации промышленности, организации Российской академии наук, ВУЗы, малые предприятия.

Рассмотрим результаты завершенных к 2016 году мероприятий ФЦП [1, 2] по направлению 1 – СВЧ электроника.

Общие объемы финансирования мероприятий по направлению в период 2007-2015 гг. составили 8 791 523,76 тыс. рублей, в том числе 5 658 806,00 тыс. рублей (64,4%) – из средств федерального бюджета, 3 132 717,76 тыс. рублей (35,6%) – из средств внебюджетных источников. Средства федерального бюджета использованы собственно на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИР и ОКР), средства из внебюджетных источников направлялись на развитие производственно-технологической инфраструктуры, в том числе на закупку технологического оборудования и выполнение пуско-наладочных работ, закупку контрольно-измерительного оборудования, изготовление, ввод в эксплуатацию и аттестацию стендового оборудования, подготовку и ремонт производственных помещений и инженерной инфраструктуры, выполнение вспомогательных расчетов и обеспечивающих исследований, организацию и проведение дополнительных испытаний, информационные и сервисные услуги, поддержку лицензий программного обеспечения, организацию новых рабочих мест.

Ключевыми проблемами по состоянию на 2007 год в области СВЧ электроники являлись:

- вакуумная СВЧ электроника 15 лет не получала развития, но пока сохраняло паритет с основными мировыми производителями по основной номенклатуре благодаря созданному в 80-90-е годы заделу;

- полупроводниковая СВЧ электроника имела отставание от основных мировых производителей по всем показателям в среднем на 7-15 лет.

Состояние СВЧ электроники имело в 2007 году следующие основные показатели:

- технология МИС СВЧ базировалась на технологиях FET и DMOS, не позволяющих получить достаточные мощности и КПД выходных усилителей, процент выхода усилительных МИС не превышал 1-5%, управляющие и преобразовательные устройства изготавливались по гибридной технологии;

- уровень топологического разрешения полупроводникового производства предприятий отрасли составлял 2,0...0,35 мкм, что затрудняло продвижение СВЧ приборов и устройств в коротковолновую часть см и мм диапазонов;

- СВЧ модули изготавливались в гибридном исполнении, имели большую массу и габариты, не позволяющие формирование радиоэлектронной аппаратуры с активными фазированными антенными решетками (АФАР).

Поэтому важнейшими мероприятиями, положенными в основу мероприятий ФЦП явились:

- создание мощных СВЧ транзисторов и широкой номенклатуры МИС СВЧ на основе гетероструктур материалов группы АЗВ5, приема-передающих СВЧ модулей см и мм диапазонов;

- создание мощных полупроводниковых СВЧ приборов и МИС СВЧ на основе нитридных и других широкозонных полупроводниковых гетероструктур;

- создание МИС СВЧ высокой степени интеграции на основе гетероструктур «кремний – германий»;

- создание сверхмощных электровакуумных СВЧ приборов повышенной надежности, эффективности и долговечности, вакуумных СВЧ приборов нового поколения;

- выполнение измерений и создание базовых конструкций установок автоматизированного контроля параметров нелинейных моделей СВЧ полупроводниковых структур, мощных транзисторов и МИС СВЧ для массового производства;

- создание мощных вакуумно-твердотельных малогабаритных СВЧ устройств нового поколения с улучшенными массогабаритными и спектральными характеристиками для перспективных радиоэлектронных систем двойного назначения;

- создание СВЧ приборов коротковолновой части мм диапазона (до 200 ГГц), в том числе на наногетероструктурах с квантовыми дефектами;

- создание и освоение производства портативных фазированных блоков аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн на основе магнитоэлектронных, твердотельных и высокоскоростных цифровых приборов и устройств с функциями адаптации и цифрового диаграммообразования.

В целом мероприятия ФЦП были нацелены на комплексное развитие отечественной СВЧ электроники, включая развитие СВЧ приборостроения, развития СВЧ технологий и технологической базы предприятий отрасли, электронного СВЧ материаловедения, испытательной и метрологической базы. Всего было сформировано 25 мероприятий, для достижения целей которых были заданы 108 работ (9 НИР и 99 ОКР). Обобщенная

структура мероприятий применительно к технологическому развитию отрасли приведена на рисунке 1.

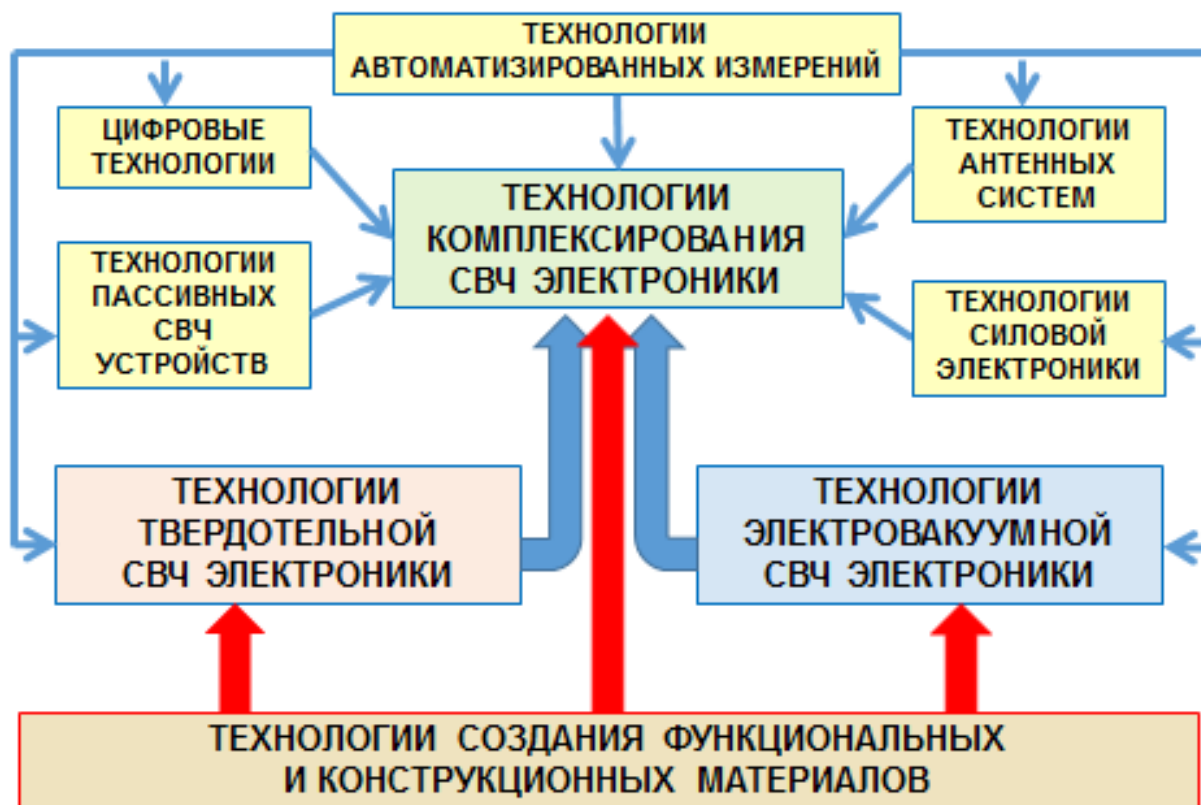


Рис. 1. Обобщенная структура мероприятий ФЦП в части развития СВЧ электроники

В результате реализации мероприятий ФЦП сохранены и получили развитие научные школы в области радиофизики, электродинамики, математического моделирования, автоматизированного проектирования и технологических процессов изготовления изделий СВЧ техники, получили дальнейшее развитие научно-технический и производственный базис для разработки и производства конкурентоспособной наукоемкой электронной и радиоэлектронной продукции в целях решения приоритетных задач социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности Российской Федерации.

Было обеспечено решение важнейших государственных задач, в том числе:

- обеспечены отечественные радиоэлектронные средства и системы, в первую очередь средства и системы, имеющие в основном стратегическое значение для страны, российской электронной компонентной базой необходимого технического уровня;

- разработаны базовые промышленные технологии и базовые конструкции СВЧ радиоэлектронных компонентов и приборов;

- разработаны технологии производства мощных транзисторов и монолитных СВЧ схем на основе гетероструктур материалов группы A_3B_5 и прямо-передающих СВЧ субмодулей X-диапазона;

- разработаны базовые технологии изготовления СВЧ транзисторов и интегральных схем на широкозонных материалах;

- разработаны базовые технологии изготовления электровакуумных СВЧ приборов нового поколения – мощных истронов и передающих устройств на их основе для систем цифрового телевидения;

- разработаны технологии измерений и базовые конструкции установок автоматизированного контроля параметров нелинейных моделей сверхвысокочастотных полупроводниковых структур, мощных транзисторов и монолитных интегральных систем сверхвысокочастотных диапазонов для массового производства;

- разработаны базовые технологии изготовления мощных вакуумно-твердотельных малогабаритных модулей нового поколения с улучшенными массогабаритными и спектральными характеристиками для перспективных радиоэлектронных систем различного назначения;

- разработаны технологии изготовления приборов на частоты 150 ГГц и более на основе легированных арсенид-галлиевых структур, а также СВЧ приборов на основе наногетероструктур с квантовыми ямами;

Также получили дальнейшее развитие технологии создания вакуумной сверхвысокочастотной электроники, в том числе работы по малогабаритным многолучевым клистродам, имеющим мировой приоритет. В результате выполнения работ получены приборы с уникальным набором технических и эксплуатационных характеристик, в том числе со сниженным временем готовности, расширенной полосой рабочих частот и увеличенной удельной мощностью.

Разработана базовая технология создания СВЧ приборов – мощных СВЧ полупроводниковых приборов и монолитных интегральных схем с рабочими частотами 40 ГГц и более на основе широкозонных полупроводников (нитрида галлия и карбида кремния).

Разработана базовая технология производства поликристаллических алмазов и изготовления алмазных полупроводящих пленок для высокотемпературных устройств и приборов.

Разработаны технологии получения композитов, клеев и герметиков в целях выпуска нового класса радиоэлектронных компонентов и приборов.

Разработаны базовые конструкторские решения, обеспечивающие наиболее эффективный способ размещения и соединения блоков и узлов, повышение механической прочности, уменьшение габаритных характеристик и оптимизацию тепловых нагрузочных характеристик радиоаппаратуры с соблюдением требований соответствия действующим мировым стандартам и аналогам; использования магистрально-модульного принципа при создании аппаратуры двойного и гражданского назначения, учета требований информационных технологий поддержки жизненного цикла, обеспечения возможности экспорта аппаратуры с учетом задач импортозамещения и конкурентоспособности по технико-экономическим показателям, обеспечения технической и радиотехнической совместимости с объектами-носителями; использования современных материалов и технологий формообразования.

Разработаны базовые технологические процессы создания серии импортозамещающих межблочных и внутриблочных герметичных соединителей в диапазоне частот 0-40 ГГц для электронных модулей и базовых несущих конструкций нового поколения, отличающихся более высокой функциональной интеграцией и являющихся основой формирования современной унифицированной радиоэлектронной аппаратуры и систем.

Разработана базовая технология создания облегченных базовых несущих конструкций из алюминиевых сплавов и композиционных материалов типа Al-SiC для радиоэлектронной аппаратуры авиационного и космического базирования с повышенной в 1,5-2 раза стойкостью к внешним воздействиям и эффективным теплоотводом по элементам конструкции. Разрабатываемые облегченные базовые несущие конструкции планируется использовать для замены оснований из псевдосплава МД-50 (медь-молибден) в СВЧ модулях авиационного и космического применения для снижения массы конструкции, повышения надежности, улучшения теплоотвода и стоимости при массовом производстве.

Разработаны технологии изготовления термонагруженных печатных плат с большой теплопроводностью и высокими диэлектрическими свойствами, получили развитие лазерные технологии изготовления печатных и керамических плат.

Проведены исследования по созданию конструкций и технологий изготовления GaAs-гетероструктур с удельной мощностью более 2,5 Вт/мм (мировой уровень 1,1 Вт/мм) и СВЧ приборов (СВЧ транзисторов и усилителей мощности) на их основе. Последующее внедрение разрабатываемой технологии в практику разработок и производства предприятий отрасли позволит создавать усилители мощности с высоким КПД для применения в перспективной радиоэлектронной аппаратуре широкого применения, в том числе в аппаратуре космического базирования;

- проведены исследования по созданию твердотельных генераторов на основе лавинно-пролетных диодов на частотах до 200 ГГц, что позволит при последующем внедрении в практику разработок и производства обеспечить создание малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры для перспективных систем радиолокации, систем посадки самолетов и вертолетов, систем «радиовидения», систем обеспечения безопасности и средств специального назначения.

- выполнен комплекс работ по созданию и развитию вертикально интегрированных систем автоматизированного проектирования сложных электронных компонентов, аппаратуры и систем с целью достижения мирового уровня.

Внесен значительный вклад в развитие новых секторов рынка, в том числе в областях:

- обеспечения создания и производства средств координатно-временного обеспечения, в том числе системы ГЛОНАСС;

- обеспечения создания и производства техники цифрового телевидения;

- авионики;

- создания и производства современного медицинского оборудования, в том числе мобильного типа;

- создания радиоэлектронной инфраструктуры обеспечения безопасности;

- обеспечения создания военной и специальной электронной компонентной базы и радиоэлектроники.

Реализация мероприятий ФЦП, создание и развитие технологий СВЧ электроники позволили сформировать современный облик базовых производственно-технологических комплексов (рисунки 2 и 3) и определили выпуск перспективной серийной продукции на период до 2020 года и последующие годы в нарастающих объемах.

	GaAs FET, PHEMT, PIN, E/D, HBT GaN PHEMT (1-100 ГГц), ЛПД, СВЧ модули, ФП СВЧ, РЭА и СЧ РЭА	АО «НПП «Исток» им. Шокина
	Si CMOS, HBT GaN PHEMT (0-10 ГГц) СВЧ модули, СЧ РЭА	АО «НПП «Пульсар», АО «ГЗ «Пульсар», АО «Светлана»
	Диоды Ганна GaAs PHEMT, E/D, MHEMT СВЧ модули, СЧ РЭА	АО «НИИПП»
	SiGe BiCMOS	АО «НИИМЭ и Микрон»
	Ферритовые СВЧ приборы	АО «НИИ «Феррит- Домен», НП ОАО «Фаза»

Рис. 2. Базовые производственно-технологические комплексы полупроводникового СВЧ приборостроения

	Сверхмощные однолучевые клистроны. Многочувые клистроны большой и средней мощности. Малогабаритные многочувые клистроны. ЛБВ на ЦСР большой и средней мощности. Комплексированные устройства и передатчики на основе МЛКи ЛБВ.	АО «НПП «Исток» им. Шокина
	Широкополосные ЛБВ и комплексированные устройства на их основе	АО «НПП «Алмаз»
	Сверхмощные и мощные многочувые клистроны	АО «НПП «Торий»
	Малогабаритные магнетроны мм-диапазона	АО «Плутон»
	Приборы М-типа	ОАО «Тантал»

Рис. 3. Базовые производственно-технологические комплексы электроракуумного СВЧ приборостроения

Таким образом, в результате выполнения мероприятий ФЦП созданы, внедрены и освоены в производстве новые для отечественной радиоэлектронной отрасли технологические процессы полупроводниковой СВЧ электроники, позволившие значительно сократить (с 7-15 до 1-5 лет) разрыв в отставании от мировых производителей СВЧ электроники и приступить к разработкам необходимой номенклатуры СВЧ приборов и устройств (до 80%).

Получили развитие технологии электровакуумной СВЧ электроники и технологии создания вакуумно-твердотельных СВЧ комплексированных устройств, позволившие сохранить технологический паритет с ведущими мировыми производителями.

В то же время, в настоящий период развития отрасли производственно-технологическая база серийного производства СВЧ электроники отстает от уровня разработанных технологий и возможностей дизайн-проектирования. С учетом реализации инвестиционных проектов технологической модернизации и технологического перевооружения производств предприятий СВЧ электроники все разработанные к настоящему времени в рамках ФЦП базовые технологии имеют потенциал внедрения и серийного освоения.

Основными направлениями дальнейшего технологического развития СВЧ электроники, которые должны быть положены в основу формируемых в настоящее время государственных программ, являются:

- совершенствование технологий создания и конструкций СВЧ транзисторов и МИС на основе гетероструктур традиционных полупроводниковых материалов: кремния и арсенида галлия с целью получения предельно достижимых электрических и эксплуатационных параметров;

- разработка и внедрение технологии создания СВЧ транзисторов и МИС на основе широкозонных полупроводниковых материалов (GaN, SiC, InP, алмаз, графен), в том числе КВЧ диапазона (60...300 ГГц);

- разработка и внедрение технологии создания широкой номенклатуры многофункциональных однокристалльных МИС СВЧ (типа «система на кристалле»), включающих аналоговые, переключательные и цифровые схемы;

- разработка и внедрение технологии создания многофункциональных многослойных многокристалльных СВЧ модулей вида «система в корпусе», в том числе на основе использования многослойных керамических плат со встроенными пассивными компонентами и цепями согласования;

- создание и развитие отечественных фаундри в области СВЧ, аналогичных зарубежным TriQuint, Win Semiconductors, IHP, Ommic, Cree и др. со стабильным технологическим процессом, приемлемым выходом годных (50...70 %);

- разработка промышленной технологии и создание элементной базы радиофотоники на основе инновационных решений науки и технологий, лежащей на стыке СВЧ и интегральной фотоники;

- совершенствование существующих и внедрение новейших технологий и базовых конструкций для создания мощных многолучевых малогабаритных электровакуумных

приборов и комплексированных устройств на их основе с низкими уровнями питающих напряжений, в том числе СВЧ приборов мм- и терагерцового диапазонов;

- создание и реализация алгоритмов, моделей и программного обеспечения для решения 2...3-х мерных электронно-оптических задач и моделирования электровакуумных приборов СВЧ (клинтронов и ламп бегущей волны), ориентированных на использование кластерных вычислительных систем, многопроцессорных систем и графических ускорителей;

- создание для вновь осваиваемых технологических процессов стандартизованных технологических дизайн-китов (PDK), совместимых с современными серийными лицензионными САПР МИС СВЧ (ADS, AWR, Cadence, Synopsys), доступных и пригодных для передачи отечественным дизайн-центрам (СВЧ фаблес), что должно обеспечивать номинальную загрузку производства собственными и сторонними проектами (в режиме MPW или ENG);

- вовлечение в процесс загрузки отечественных СВЧ-фаундри специализированных дизайн-центров по проектированию СВЧ приборов, в том числе на базе ВУЗов, располагающих современными лицензионными САПР МИС СВЧ, квалифицированными кадрами схемотехников, топологов, специалистов по моделям и отлаженным маршрутом сквозного проектирования, адаптированным под технологии конкретных зарубежных и отечественных производств СВЧ приборов;

- привлечение существующих и развивающихся в стране экспериментальных технологических линеек, в том числе на базе организаций РАН и ВУЗов, в качестве стратегических партнеров предприятий СВЧ подотрасли для отработки без ущерба для выпуска серийной продукции новых и совершенствования существующих технологических процессов, конструктивно-технологических, схематопологических решений с последующим переносом и внедрением полученных результатов на базовые серийные производства.

Библиографический список

1. Федеральная целевая программа «Национальная технологическая база на 2007-2011 годы». http://www.programs-gov.ru/34_1.php.
2. Федеральная целевая программа «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008 - 2015 годы (Постановление Правительства РФ от 26 ноября 2007 г. № 809).
3. С.В.Щербаков. Развитие СВЧ электроники в России. Материалы научно-технической конференции «СВЧ-электроника – 2016», Фрязино, 18 – 19 мая 2016 г.