

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВЧ-СИСТЕМ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В ближайшее десятилетие элементы электронной компонентной базы СВЧ будут использоваться не только для военных, но и для гражданских применений, таких как системы радиолокации, системы сотовой связи и телекоммуникаций. Роль этих систем и используемых в них СВЧ-устройств в практике гражданских применений трудно переоценить. Потенциал развития отечественной науки и техники в области создания аппаратуры для телекоммуникаций в миллиметровом диапазоне длин волн достаточно высок, для того чтобы создавать системы и средства только на отечественной твердотельной компонентной базе СВЧ. В статье рассмотрены конструктивно-технологические подходы и представлены результаты создания дискретных приборов и систем СВЧ-диапазона двойного назначения, пригодных для гражданских применений.

## ВВЕДЕНИЕ

Для предприятия, специализирующегося в области СВЧ-микроэлектроники, важно участвовать в создании электронной компонентной базы (ЭКБ) на основе арсенида галлия, элементы которой используются для новых радиотехнических систем. В НИИПП разрабатываются и выпускаются такие базовые элементы, как генераторные диоды Ганна, диоды с барьерами Шотки, полевые и биполярные транзисторы – основа для развития большинства интегральных схем (ИС).

Новым на данном этапе (одновременно с разработкой требуемой номенклатуры элементов и ИС) является необходимость создания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) двойного назначения на основе этой номенклатуры. Эта практика характерна для всех ведущих компаний мира. Такая постановка задачи потребовала от нас владения в равной степени не только проектированием твердотельных СВЧ ИС, но и проектированием РЭА в целом. Использование наработок в обла-



А. Пономарев, В. Юрченко, Э. Яук

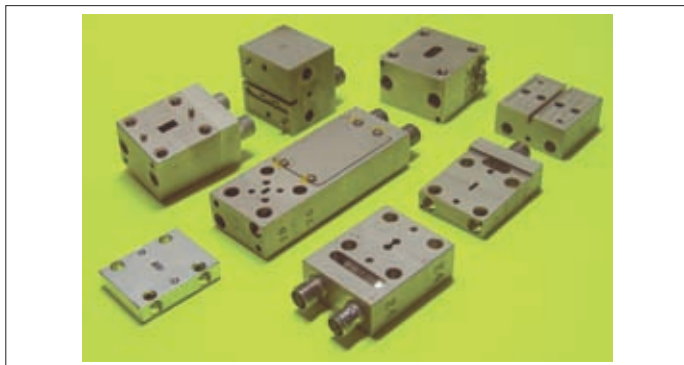
сти технологии GaAs-схем и дискретных СВЧ-приборов и новая организационная структура позволили НИИПП осуществить в 90-е годы прорыв в области создания цифровой РЭА.

Ниже представлен краткий обзор методов организации проектирования, конструктивно-технологических подходов и результатов, достигнутых в создании дискретных приборов и РЭА для СВЧ-диапазона.

## МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ЦИФРОВОЙ РЭА

Наше поступательное развитие исторически шло от дискретных приборов СВЧ-микроэлектроники к созданию РЭА и систем на ее основе. Сначала, а по ряду устройств и сегодня работу по созданию РЭА разделяли на самостоятельные этапы, поручая их выполнение отдельным группам специалистов разного профиля. Аппаратура в целом проектировалась специалистами радиотехнического профиля, а ИС – разработчиками полупроводниковых приборов.

При таком подходе работа над каждой ИС выливалась в отдельную тему, выполняемую группой соответствующих специалистов. Если таких ИС несколько, то работа по созданию РЭА превращается в сложную организационную задачу, в решении которой задействованы одновременно главный конструктор РЭА и разработчики отдельных ИС (не считая стоящих за ними коллективов с разными целями и сроками их выполнения). Это неизбежно приводило к противоречиям целей и интересов и, как результат, к затягиванию выполнения работ в целом, не говоря об ошибках, неизбежно возникающих на всех стадиях проектирования.



**Рис. 1. Монолитные балансовые смесители**

Этот этап развития СВЧ-микродэлектроники, который предполагалось встроить в процесс проектирования РЭА, завершился большим количеством макетных и опытных образцов арсенид-галлиевых ИС и модулей на их основе, которые редко удавалось объединить в единую, эффективно функционирующую аппаратуру.

Главный конструктор ведет процесс сквозного проектирования, включая схемотехническое проектирование аппаратуры, топологическое проектирование всех ИС и ГИС, и определяет фронт работ по созданию вспомогательных функциональных узлов, сборке и настройке РЭА в целом. Метод сквозного проектирования дает возможность не только создавать РЭА, обладающую высокими техническими характеристиками, но и делать десятки вариантов ИС без изменения проектируемой системы в целом. Нужно иметь в виду, что предприятия электронной отрасли проводят такую работу более глубоко в технологическом плане, чем это делают предприятия радиотехнической отрасли.

Именно предварительные наработки по созданию ЭКБ СВЧ-диапазона и сквозное проектирование ГИС, МИС и РЭА в целом позволяют выйти на рынок систем двойного назначения.

### **КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ МИС**

Основные особенности конструкций и технологии монолитных схем миллиметрового диапазона, предназначенных для монтажа в Е-плоскости волновода, наиболее полно описаны в работе [1]. Принципиальная особенность технологии и конструкции малых интегральных схем (МИС) такого типа состоит в том, что при разделении пластины на отдельные чипы-схемы удаляется большая часть подложки вместе с  $n^+$ - $n$ -слоями.

**Таблица 1. Параметры смесителей**

Диапазон частот, ГГц	Полоса, %	Потери преобразования, дБ	Кэфф. шума, дБ	Развязка, дБ
26,0–37,5	40	5,0–6,0	2,5–3,5	30–35
37,5–53,0	40	5,0–6,0	2,5–3,5	30–35
52,0–78,0	40	5,0–6,0	2,5–3,5	25–30
78,0–119,0	30	5,0–7,0	3,0–4,0	25–30
118,0–178,0	20	7,0–8,0	3,5–4,5	20–25

**Таблица 2. Параметры монолитных генераторов Ганна**

Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, мВт	Выходная мощность (с перестройкой, перепад мощности $\leq 1$ дБ), мВт	
		Перестройка $\Delta f \leq 0,7$ ГГц	Перестройка $\Delta f \leq 3,0$ ГГц
26,0–37,5	250	200	30
37,5–53,0	150	100	30
52,0–78,0	150–40–25	100–40–20	–
78,0–119,0	25–5	20–3	–

Несущей конструкцией МИС является не подложка, как в обычных МИС, а слой металлизации. Толщина слоя металлизации порядка 10 мкм позволяет осуществить монтаж схем в волноводе. Размеры схем таковы, что они ложатся на края волноводного канала с перекрытием в 100–200 мкм. Малая толщина металлизации исключает необходимость создания специальной выемки в корпусе под схему. Она закрепляется сжатием двух половинок волноводного корпуса. На рис. 1 приведены смесители и генераторы Ганна (см. их параметры в табл.1–3), выполненные согласно описанным принципам.

МИС изготавливается с выводами для подачи питания и других сигналов, которые при монтаже легко отгибаются благодаря специальной форме. В конструкции корпуса предусмотрены выемки для размещения кристаллов-фильтров, выходящих за пределы волноводного канала, для исклю-

**Таблица 3. Параметры генераторов Ганна с удвоением частоты**

Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность на фиксированной частоте, мВт	Выходная мощность (с перестройкой), мВт
		Перестройка $\Delta f \leq 1,0$ ГГц
60,0–78,0	100–60	60–40
78,0–119,0	60–40	40–30
119,0–140,0	40–20	20–10
118,0–200,0	40–10	20–5

чения возможности короткого замыкания между выводами и корпусом.

Для модулей и устройств, предназначенных для работы в жестких условиях, предусмотрено заполнение волноводного канала диэлектриком – специальным пенопластом с низкой (<1,5) диэлектрической проницаемостью и малыми потерями. При этом механическая прочность модулей увеличивается настолько, что они выдерживают ударные нагрузки более 20000 г. Более того, СВЧ-модули с заполнением выдерживают длительные испытания на влагостойкость.

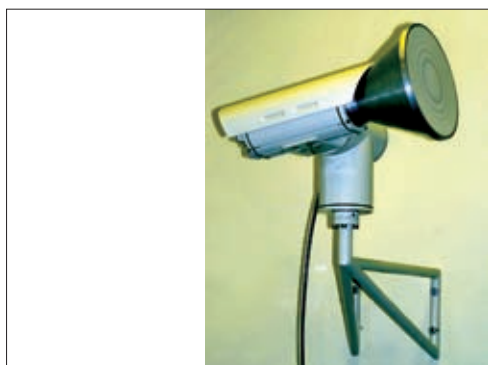
Использование этих решений позволило разработать в 2002 году миниатюрный (<7 см<sup>3</sup>) ударопрочный 2-канальный приемопередатчик 3-мм диапазона. Планируется осуществить еще две опытно-конструкторские разработки в развитие этого направления, которые позволят повысить дальность и уменьшить размеры модулей.

На рис. 1–3, а также на Web-сайте НИИПП [2] приводятся результаты отдельных разработок различных МИС, выполненных в последние годы и предназначенных для создания модулей и устройств СВЧ-диапазона.

**СИСТЕМЫ И МОДУЛИ**

Используя новые элементы, можно получить высокие технические характеристики там, где требуется обеспечивать очень быструю перестройку частоты в широком диапазоне рабочих частот. Из всех областей радиотехники можно выделить три направления, на которых важнейшей проблемой является сверхточная сверхскоростная цифровая широкополосная перестройка частоты. Это – радиолокация, радиопротиводействие и телекоммуникации.

В радиолокации широко используются линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ) сигналы с очень большим диапазо-



**Рис.2. Система цифровой беспроводной передачи данных DTS-10HDA**



**Рис.3. Прибор экспресс-контроля технического состояния тормозных систем автотранспортных средств в дорожных условиях**

ном перестройки по частоте. Поэтому в составе средств, используемых в радиолокационной технике, необходимо иметь широкополосные высокочастотные тракты, позволяющие синтезировать, преобразовывать, принимать и анализировать широкополосные сигналы.

Другой областью, в которой ЭКБ СВЧ определяет основные тактико-технические характеристики, является аппаратура радиоэлектронного противодействия (РЭП). Ее задача – быстрое обнаружение, распознавание, анализ и синтез радиочастотных сигналов активной помехи, их усиление, излучение и подавление источника сигналов противника.

С технической точки зрения для этих целей нужно разработать возбудитель – быстродействующий цифровой синтезатор сигнала надлежащей амплитуды, частоты и фазы, обеспечивающий безынерционный синтез сложных сигналов по заданному алгоритму. Как правило, синтезаторы должны обеспечивать многоканальный режим работы с очень быстрым переключением каналов. Созданная в НИИПП БИС цифрового синтезатора частоты наилучшим образом подходит для разработки образца возбудителя ВГ-502М в составе станций Р-934У.

СВЧ ППМ активной фазированной антенной решетки (АФАР) на основе GaAs МИС востребованы в радиолокационной технике наземного и авиационного базирования. Начиная с 2007 года планируются поставки не менее 100 тысяч штук ППМ. В состав ППМ АФАР входят (наряду с другими) следующие

**Таблица 4. Технические характеристики цифровой системы передачи**

Рабочий диапазон частот, ГГц	74-75,5
Мощность излучаемого сигнала, мВт	не более 7
Максимальная ширина полосы излучаемого сигнала, МГц:	
по уровню 3 дБ	не более 200
по уровню 30 дБ	не более 500
Уровень внеполосных и побочных излучений, дБ	не более 30
Коэффициент шума приемника, дБ	не более 8
Номинальное значение промежуточной частоты, ГГц	1,5
Ширина полосы приемника, МГц:	
по уровню 3 дБ	не более 200
по уровню 30 дБ	не более 500
Чувствительность приемника, дБ/мВт	менее 55
Коэффициент ошибок	не более 10 <sup>-8</sup>



**Таблица 5. Характеристики системы контроля параметров**

Параметры	Диапазон измерений	Погрешность
Тормозной путь, м	5–60	2,5%
Замедление, м/с <sup>2</sup>	0–10	3%
Поперечное смещение, м	0–5	2,5%
Время срабатывания, с	0,3–2	0,02 с
Неодновременность срабатывания тормозов, с	0–2	0,02 с
Усилие управления тормозной системой, Н	0–800	5%
Поперечное ускорение, м/с <sup>2</sup>	0–5	3 %
Начальная скорость АТС, км/ч	до 60	1%

щие МИС: маломощный усилитель, скоростной переключатель/модулятор и усилитель мощности. Производство этих узлов имеет большое значение для отечественного рынка радиокомпонентов систем микросотовой связи и сотового цифрового телевидения.

Российский рынок в настоящее время потребляет значительное количество современных средств связи (включая радиорелейные линии, компьютерные линии связи, сотовые системы связи, спутниковые системы связи, линии передачи телевизионных сигналов и др.). В настоящее время в Сибирском регионе развивается производство средств связи СВЧ в диапазоне частот от 2 до 96 ГГц. На рис.2 представлена разработанная НИИПП система цифровой передачи данных, технические характеристики которой сведены в табл.4

Это производство вызывает у производителей потребность в формировании отечественной ЭКБ в виде связанных ППМ и частотно-задающих цепей к ним. Оценка требуемого объема поставок ППМ различных типов может вырасти до уровня 80 миллионов долларов США в год. СВЧ-модули, соответствующие по характеристикам зарубежным изделиям, разработаны НИИПП [2] и НПФ "Микран" в рамках программы совместной деятельности двух предприятий.

На рис.3 представлена система контроля параметров тормозной системы, выполненная на базе автодинных модулей типа "Тигель". Ее характеристики приведены в табл.5. Развитие этих модулей идет в рамках опытно-конструкторских работ. Такой, в частности, является разработка "КВЧ-датчика для обнаружения низколетящих воздушных целей".

Используемая технология GaAs ИС обеспечивает достижение плотности элементов на уровне 200 000 элементов/см<sup>2</sup>. Оптимальные размеры транзистора в ИС находятся в диапазоне от 5х5 до 5х2000 мкм<sup>2</sup>. Длина затвора ПТШ в цифровых многоэлементных ИС составляет 0,8–1,2 мкм, а в усилителях лежит в пределах от 0,2 до 0,4 мкм. Ширина токоведущих дорожек доведена до 3,0 мкм, минимальный диаметр переходных отверстий в межслойной изоляции также равен 3,0 мкм. Постоянная и целенаправленная работа по уменьшению размеров кристалла ИС дает возможность изготавливать кристаллы GaAs ИС размером не более 1,5х1,5 мм<sup>2</sup>. Сейчас развертываются работы по созданию GaAs ИС на базе эпитаксиального материала, выращенного в ИФП СО РАН методом

молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), и проводится запуск МОС и МЛЭ установок в НИИПП.

## ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Институт НИИПП представляет собой коллектив, способный в короткие сроки реализовать конструкторские и технологические идеи, разработать и выпустить современную РЭА двойного назначения с использованием собственной ЭКБ.

Непрерывность инновационного цикла РЭА СВЧ-диапазона осуществляется при сквозном проектировании от разработки экспериментальных технологий до разработки промышленных технологий, предназначенных для выпуска продукции двойного назначения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Божков В.Г. и др. Монолитные и квазимонолитные модули и устройства миллиметрового диапазона длин волн // Электронная промышленность. 2001. №5, с.77–97.
2. [www.niipp.ru](http://www.niipp.ru)
3. Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Некоторые применения гибридно-интегральных автодинов КВЧ-диапазона в радиолокационных устройствах. Сб. докладов конференции "RLNC 2004". С.1691.