

К. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН, к. ф.-м. н. С. Б. МАЛЬЦЕВ, В. А. ХИТРОВСКИЙ

Украина, г. Киев, Научно-исследовательский институт «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-МОДУЛИ ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Представлен научно-технический и производственно-технологический потенциал НИИ «Орион» в области создания твердотельных комплексированных СВЧ-модулей, которые изготавливаются на собственных кремниевой и арсенид-галлиевой технологических линиях. Совокупность этих изделий составляет элементную базу для перспективной аппаратуры, оборудования и систем, работающих в диапазоне частот до 200 ГГц.

Ключевые слова: синтезатор частот, генератор волн миллиметрового диапазона, умножитель частоты, модулятор, фазовращатель, усилитель, приемопередающий СВЧ-модуль, Si-ЛПД, $p-i-n$ -диоды.

Государственный научно-исследовательский институт «Орион» в настоящее время является ведущим предприятием Украины в области создания электровакуумных и полупроводниковых приборов, компонентов и устройств, работающих в диапазоне частот до 200 ГГц. В данной статье представлен научно-технический и производственно-технологический потенциал института.

В НИИ «Орион» создана научная школа исследования и разработки полупроводниковых СВЧ-компонентов и устройств миллиметрового диапазона длин волн. Имеющиеся кремниевая и арсенид-галлиевая технологии позволяют создавать высококачественные активные и пассивные СВЧ-приборы, модули и компоненты, а также многофункциональные устройства на их основе. Твердотельная компонентная база радиотехнической аппаратуры и оборудования диапазона частот до 200 ГГц [1, 2] включает в себя:

- многофункциональные твердотельные устройства (синтезаторы частот, приемные, передающие и приемопередающие СВЧ-модули);
- однофункциональные полупроводниковые СВЧ-компоненты (генераторы, усилители, умножители частоты, смесители, переключатели, аттенюаторы, модуляторы, фазовращатели);
- полупроводниковые СВЧ-приборы (Si IMPATT-диоды, $p-i-n$ -диоды, GaAs диоды Ганна).

Технический уровень научно-технической продукции НИИ «Орион» не уступает лучшим образцам мировой СВЧ-электроники. Ряд СВЧ-компонентов не имеет аналогов, а их характеристики существенно превышают уровень известных зарубежных компонентов. НИИ «Орион»

является лидером в области разработки и изготовления мощных твердотельных передающих устройств с выходной мощностью 50–100 Вт в 8-мм, 25–30 Вт в 3-мм и 1,5–2,0 Вт в 2-мм диапазонах длин волн (при длительности импульса 100–200 нс и скважности 200–400).

Особо значительны достижения НИИ «Орион» в области создания всей совокупности приборов и устройств, составляющих компонентную базу для создания радиоэлектронной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн (8-, 5-, 3- и 2 мм), к которой в последнее время во всем мире наблюдается повышенный интерес. Радиотехнические системы миллиметрового диапазона позволяют обеспечить недоступные в других участках спектра электромагнитных волн информативность и помехоустойчивость при одновременной минимизации массогабаритных характеристик и параметров энергопотребления.

Имеющийся в НИИ уникальный технологический цикл разработки СВЧ-приборов и компонентов предполагает детальное автоматизированное проектирование твердотельных СВЧ-узлов, что позволяет выполнять моделирование как отдельных компонентов, так и многофункциональных устройств. Автоматизированное проектирование и производство эффективно используется на всех этапах разработки и изготовления приборов, обеспечивая оптимизацию их характеристик и высокую степень надежности и повторяемости выходных параметров конечной продукции.

Используемое в НИИ специализированное лабораторно-стендовое и контрольно-испытательное оборудование позволяет выполнить детальный анализ и оценку технических характеристик всех выпускаемых приборов, компонентов и модулей на различных этапах сбор-

ки, а также имитировать многообразные условия эксплуатации СВЧ-модулей, в том числе их способность нормально функционировать при воздействии различных факторов внешней среды.

Особое место в научно-технической и производственной деятельности НИИ «Орион» занимает разработка элементов компонентной базы СВЧ-техники, предназначенной для создания современной радиолокационной аппаратуры и оборудования, в том числе:

- РЛС ближнего действия с высокой разрешающей способностью по дальности различного назначения [3];

- РЛС для навигационной аппаратуры и систем дистанционного контроля параметров окружающей среды;

- бесконтактные датчики прецизионного измерения уровня заполнения объемов сыпучими и жидкими средами;

- бесконтактные высокоточные измерители параметров движения наземных и воздушных объектов, предназначенных для контроля и управления движением транспортных средств;

- метеорологические РЛС.

Имеющиеся технические возможности и 50-летний опыт успешной работы в области создания прецизионной аппаратуры позволили специалистам НИИ «Орион» создать целый ряд высококлассных многофункциональных синтезаторов частот для использования в современных когерентных бортовых радиолокационных системах с высокой разрешающей способностью.

Когерентность является одним из важных отличительных признаков современной радиолокационной системы, поскольку на нынешнем этапе развития радиолокационной техники именно когерентная обработка принятых сигналов позволяет достигать необходимого уровня характеристик обнаружения РЛС и ее помехозащищенности. В частности, разработанный сверхмаломощный виброустойчивый многофункциональный быстродействующий фазокогерентный синтезатор частот для вертолетной РЛС формирует сетку частот первого гетеродина (36 частот, время переключения 2–8 мкс по критерию остаточной фазовой погрешности 5 градусов), фиксированную частоту второго гетеродина, вторую промежуточную частоту, а также опорную и тактовую частоты. Реально измеренные значения фазовых шумов синтезируемых сигналов первого гетеродина (X-диапазон) составляют минус 110 дБн/Гц при отстройке 1 кГц, 115 дБн/Гц при отстройке 10 кГц и 125 дБн/Гц при отстройке 100 кГц. Относительная нестабильность всех синтезируемых частот в интервале рабочих температур от минус 50°C до 60°C составляет $1,5 \cdot 10^{-6}$. Следует отметить, что такой высокий уровень параметров достигнут при массе синтезатора 7 кг и потребляемой мощности менее 23 Вт [4].

Для работы в составе когерентной РЛС управления движением судов при подходе к портам, а

также для обзора летного поля аэродромов, специалистами НИИ «Орион» разработан твердотельный приемопередатчик. Он выполнен в виде отдельного герметизированного блока, обеспечивает выходную мощность не менее 50 Вт в диапазоне частот 33,5–34,5 ГГц (длительность импульса 35 или 200 нс, скважность 800). Высокая чувствительность приемного устройства достигается применением маломощного усилителя, что позволяет получить коэффициент шума всей системы $K_{ш}$ не более 5 дБ. С целью обеспечения нормальной работы приемного устройства используется защитное устройство. На входе маломощного усилителя установлен калибровочный генератор шума, включаемый внешним сигналом. Динамический диапазон в пределах 70 дБ обеспечивается за счет применения усилителя промежуточной частоты с логарифмической характеристикой. Управление длительностью импульса и частотой полезного сигнала осуществляется внешними командами.

Использование данного приемопередающего устройства в составе когерентной РЛС управления движением судов обеспечивает высокую разрешающую способность по дальности. Малое энергопотребление (около 20 Вт) позволяет осуществлять питание приемопередатчика от автономного источника, а также использовать его в качестве бортового оборудования. Перспективным является создание сети с центральным диспетчерским пунктом, данные на который поступают от распределенных по обозреваемой территории приемопередающих модулей [5].

В течение нескольких лет в НИИ «Орион» проводилась разработка приемопередающих модулей для семейства мобильных когерентных РЛС ближнего и среднего радиуса действия, предназначенных для обнаружения движущихся людей и техники с целью разведки или обеспечения охраны территории [6, 7]. Многолетний опыт поставок приемопередатчиков в ХК ОАО «Укрспецтехника» для работы в составе мобильных РЛС ближнего радиуса действия «Барсук» с непрерывным фазоманипулированным излучением (см. рис. 1, а) позволил специалистам НИИ «Орион» создать гораздо более совершенную модель носимой РЛС «Горноста́й» (см. рис. 1, б).

Кроме существенно меньших габаритов, массы и потребляемой мощности (менее 7 Вт), к преимуществам данной РЛС по сравнению с прототипом следует отнести гораздо меньшую (в пять раз!) среднюю излучаемую мощность при той же дальности обнаружения и при значительном (в 1,5 раза) уменьшении апертур передающей и приемной антенн. Высокие показатели портативной РЛС обеспечиваются использованием нового приемопередатчика с квазипрерывным режимом излучения и внутриимпульсной фазовой модуляцией, а также применением улучшенной корреляционно-фильтровой



Рис. 1. РЛС «Барсук» (а) и «Горноста́й» (б) в процессе эксплуатации

обработки принимаемых сигналов. Все это позволяет не только резко повысить обнаруживающую способность минарадар, но и реализовать функцию временной автоматической регулировки усиления, что обеспечивает уверенное обнаружение целей в ближней (до 300 м) зоне. При мощности передатчика 30–50 мВт РЛС «Горноста́й» может обнаруживать идущего человека на расстоянии до 800 м, а объекты типа автомобиль — до 2 км. Конструкция этой РЛС защищена патентом Украины №67326.

Среди промышленных применений радиолокационных датчиков особое место занимают системы для измерения уровня материалов и веществ в резервуарах. Бесконтактный радиолокационный принцип измерений позволяет эффективно и надежно работать в условиях экстремальных температур, давления, запыленности и в химически агрессивной среде. Созданный в НИИ «Орион» малогабаритный приемопередатчик W -диапазона применяется в составе радиолокационного уровнемера, предназначенного для сверхвысокочастотного непрерывного и бесконтактного измерения уровня жидких, пастообразных, твердых и сыпучих веществ в резервуарах на промышленных и энергетических предприятиях, в том числе на химических и нефтеперерабатывающих заводах.

Схема приемопередатчика позволяет реализовать очень высокую точность измерения — погрешность составляет ± 1 мм. Конструкция приемопередатчика обеспечивает эффективное и безопасное функционирование всей системы в широком интервале измеряемых величин, в разнообразных условиях среды, в том числе химически агрессивных и токсичных, а также при воздействии температуры, давления, при наличии паров, тумана и пыли. В комплексной измерительной системе применяются не только передовые СВЧ-технологии, но и современная цифровая обработка сигналов, включающая автокалибровку и самодиагностику, что существенно облегчает установку и техническое обслуживание оборудования [8].

Специалистами института для работы в составе РЛС W -диапазона разработан твердотельный когерентный приемопередатчик, в котором частота передающего канала и частота гетеродина приемного канала задаются от единого внешнего источника сантиметрового диапазона, что обеспечивает когерентную работу всего устройства. В схеме приемопередатчика использованы конкурентоспособные технические решения, выполненные на основе оригинальных кремниевых микроволновых технологий. Импульсный передатчик, как и гетеродин приемника, выполнен на основе активных кремниевых умножительных модулей миллиметрового диапазона длин волн, обеспечивающих высокую эффективность преобразования частоты при высокой кратности умножения. Роль ключевого элемента в этих модулях играет активный умножитель частоты на кремниевом умножительном лавинно-пролетном диоде (ЛПД), оптимизированном для работы в этом диапазоне. Это обеспечивает высокую эффективность преобразования частоты сигнала при больших кратностях умножения, к тому же, что особенно важно, процесс умножения происходит без существенной шумовой деградации фазы.

В импульсном передатчике используется активный умножитель частоты с коэффициентом умножения 15 и трехкаскадный твердотельный усилитель импульсного действия с внешней синхронизацией. Каждый усилительный каскад выполнен по отражательной схеме с использованием специально разработанных мощных кремниевых импульсных ЛПД. Выходная импульсная мощность передатчика составляет 10 Вт при длительности импульса выходного сигнала 60–80 наносекунд и частоте повторения импульсов 10–50 кГц.

В приемнике, построенном по гетеродинной схеме, используются балансные смесители на GaAs-диодах с барьером Шоттки. Для улучшения параметров приемника балансные смесители конструктивно выполнены совместно с малошумящими усилителями промежуточной частоты. В качестве гетеродина в приемнике используется непрерывный умножитель частоты с коэффициентом умножения 15, выполненный на основе специально сконструированного ЛПД.

Для работы в составе РЛС для волн 3-мм диапазона разработан двухканальный приемопередаточный модуль, который обеспечивает выходную импульсную мощность каждого канала 10 Вт на частоте 94 ГГц при длительности импульса выходного сигнала порядка 60–80 нс и частоте повторения импульсов 50 кГц. Передающее устройство модуля состоит из стабилизированного резонатором генератора на ЛПД, делителя мощности, двух усилителей с внешней синхронизацией и импульсного модулятора. Стабильность частоты задающего генератора не хуже 10^{-3} в интервале температур от -40 до $+55^\circ\text{C}$, что обеспечивается применением высокочастотного инварового резонатора. Резонатор работает на вол-

не H_{011} и включен в генератор по схеме стабилизатора. Сигнал задающего генератора разделяется на два канала с помощью делителя мощности. В каждом канале передатчика установлен усилитель с внешней синхронизацией с коэффициентом усиления порядка 6 дБ. Усилители выполнены на кремниевых ЛПД и включены по отражательной схеме.

Стабилизация характеристик импульсного задающего генератора и импульсных усилителей в пределах длительности импульса и в интервале внешних температурных воздействий осуществляется методом токовой стабилизации. Такая схема реализации передатчика обеспечивает формирование когерентных сигналов на двух выходах, сдвинутых относительно друг друга по фазе на 90° .

Приемник построен по гетеродинной схеме и имеет в своем составе два балансных смесителя на GaAs диодах с барьером Шоттки. Для улучшения параметров приемника балансные смесители конструктивно выполнены совместно с малошумящими усилителями промежуточной частоты. В качестве гетеродина в приемнике используется стабилизированный резонатор генератор на двухпролетном ЛПД с рабочей частотой 91,7 ГГц и стабильностью рабочей частоты гетеродина не хуже 10^{-3} в интервале рабочих температур. Коэффициент шума каждого приемного канала составляет порядка 9 дБ, коэффициент усиления каждого канала — не менее 20 дБ.

В течение ряда лет НИИ «Орион» выпускает СВЧ-модули двухмиллиметрового диапазона волн для радиолокационных систем, в том числе:

- электрически управляемые аттенюаторы с рабочей полосой частот 2 ГГц, с максимальным ослаблением 40 дБ и начальным ослаблением 1,0 дБ;
- быстродействующие модуляторы с рабочей полосой частот 2 ГГц, развязкой между каналами 20 дБ, прямыми потерями не более 2,5 дБ и с быстродействием не более 10 нс;
- генераторы импульсного действия с выходной мощностью не менее 100 мВт при длительности импульса 40–60 нс и частоте повторения 20 кГц;
- генераторы шума импульсного действия с мощностью шума 46 дБ и неравномерностью 3,0 дБ (длительность импульса выходного сигнала 75 нс, частота повторения импульсов 10,5 кГц);
- генераторы, управляемые напряжением, для использования в качестве гетеродина приемных устройств 2-мм диапазона длин волн с выходной мощностью не менее 20 мВт в рабочей полосе частот 2 ГГц. Выполнены на основе умножителя частоты с высокой кратностью умножения. В качестве источника внешнего синхронизирующего сигнала может использоваться транзисторный генератор или синтезатор частоты. При подаче на вход сигнала в диапазоне $14,0 \pm 0,1$ ГГц и при кратности умножения 10 генератор обеспе-

чивает непрерывную мощность порядка 25 мВт в рабочем диапазоне частот $140,0 \pm 1,0$ ГГц.

Для работы в 8-миллиметровом диапазоне длин волн разработаны и поставляются автогенераторы и усилители с внешней синхронизацией импульсного действия с выходной мощностью в импульсе от 20 до 100 Вт с длительностью СВЧ-импульса 50–200 нс при скважности не менее 300.

Для использования в РЛС ближнего диапазона в 8-миллиметровом диапазоне создан малогабаритный полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частот. В качестве задающего стабильного источника СВЧ-импульсов разработан малогабаритный синтезатор частоты 8-миллиметрового диапазона длин волн, формирующий СВЧ-импульсы заданной длительности с уровнем мощности 1–1,2 Вт. Синхронизированный усилитель на ЛПД обеспечивает мощность на выходе генератора до 15–20 Вт при длительности СВЧ-импульсов 100–300 нс в рабочей полосе не менее 1 ГГц. Количество переключаемых частот не менее 6 при частоте повторения 6 кГц. Длительность фронтов СВЧ-импульсов на выходе генератора составляет не более 20 нс [9].

Успешный опыт эксплуатации модулей СВЧ миллиметрового диапазона длин волн показал, что состояние техники этого диапазона позволяет успешно реализовать весь комплекс технических требований к аппаратуре различного назначения: РЛС, систем связи, приборов и устройств двойного применения, обеспечивая при этом высокую надежность работы при всех погодных условиях и небольших массогабаритных параметрах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Болтовец Н.С., Мальцев С.Б., Руденко В.Г., Рукин В.П. 50 лет развития СВЧ-электроники в НИИ «Орион» // Техника и приборы СВЧ. — 2011. — №2. — С. 3–6.
2. Болтовец Н.С., Мальцев С.Б. Развитие полупроводниковых СВЧ-технологий в НИИ «Орион» // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — №1–2. — С. 65–68.
3. Звершовский И.В., Карушкин Н.Ф., Пойгина М.И., Ярешко Ю.П. и др. Твердотельный радиолокатор ближнего действия для охраны объектов // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 1999. — Т. 42, №1. — С. 3–11.
4. Хитровский В.А., Бугай В.М., Сидько В.И. Опыт разработки синтезаторов частот для современных радиолокационных систем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — №2. — С. 4–7.
5. Гололобов В.П., Ищенко М.Г., Цвир А.В. Твердотельный приемопередатчик Ка-диапазона с выходной мощностью 50 Вт для импульсных РЛС // 2-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». — Украина, Харьков. — 2005. — Т. 5. — С. 101.
6. Хитровский В. А., Беркута Д. Н. Экономичный когерентный приемопередатчик Ка-диапазона для мобильных РЛС

ближнего радиуса действия // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — №3. — С. 33–34.

7. Хитровский В.А., Бугай В.М., Коржик О.А. Когерентный приемопередатчик Ka-диапазона для мобильных РЛС среднего радиуса действия // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — №2. — С. 11–13.

8. Бас И. А., Дручило А.В., Маковенко С.В. и др. Твердотельный приемопередатчик для FMCW-радары прецизионного измерения уровня W-диапазона // Прикладная радиоэлектроника. — 2008. — Т. 7, №1. — С. 86–89.

9. Карушкин Н. Ф., Дворниченко В. П., Мальшко В. В. и др. Полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частоты миллиметрового диапазона // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Украина, г. Севастополь. — 2012. — С. 103–105.

Дата поступления рукописи
в редакцию 29.10 2015 г.

М. Ф. КАРУШКИН, С. Б. МАЛЬЦЕВ, В. А. ХИТРОВСКИЙ

Науково-дослідний інститут «Оріон»
E-mail: ndiorion@tsua.net

ТВЕРДОТІЛЬНІ НВЧ-МОДУЛІ ДЛЯ РАДІОТЕХНІЧНОЇ АПАРАТУРИ І СИСТЕМ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Представлено науково-технічний і виробничо-технологічний потенціал НДІ «Оріон» в області створення твердотільних комплексованих НВЧ-модулів, які виготовляються на власних кремнієвій і арсенід-галієвій технологічних лініях. Сукупність цих виробів складає елементну базу для перспективної апаратури, устаткування і систем, що працюють в діапазоні частот до 200 ГГц.

Ключові слова: синтезатор частот, генератор міліметрового діапазону, помножувач частоти, модулятор, фазообертач, підсилювач, приймально-передавальний НВЧ-модуль, Si-LPD, p-i-n-діоди.

DOI: 10.15222/TKEA2016.1.03
UDC 621.373.5.52:621.373.29

N. F. KARUSHKIN, S. B. MALTSEV, V. A. KHITROVSKIY

Research Institute «Orion»,
E-mail: ndiorion@tsua.net

SOLID STATE MICROWAVE MODULES DESIGNED FOR MILLIMETER WAVE ELECTRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS

The paper presents scientific, technological and production potential of Research Institute «Orion» in the field of creation of wide range of high performance active and passive solid-state microwave devices, modules and components as well as multifunctional devices on their basis. These products taken as a whole form a component base for promising equipment and systems working in the frequency range from 1.0 to 200 GHz.

Key words: frequency synthesizer, millimeter wave range oscillator, frequency multiplier, modulator, phase shifter, amplifier, microwave transceiver, Si-IMPATT, p-i-n-diodes.

REFERENCES

1. Boltovets M.S, Maltsev S.B., Rudenko V.G., Rukin V.P. [50 years of microwave electronics development in the RI "Orion".] *Tekhnika i pribory SVCh*, 2011, no. 2, pp. 3–6. (Rus)
2. Boltovets M. S, Maltsev S. B. [The Development of solid-state microwave technology in the RI "Orion".] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2011, no 1–2, pp. 65–68. (Rus)
3. Zvershovskiy I.V., Karushkin N.F., Poygina M.I., Yareshko Y.P, etc. [Solid-state short-range radar to protect objects.] *Izvestiya vuzov. Elektronika*. 1999, vol. 42, no. 1, pp. 3–11. (Rus)
4. Khitrovskiy V.A., Bugay V.M., Sidko V.I. [Expertise in the design of frequency synthesizers for modern radar systems.] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2007, no. 2, pp. 4–7. (Rus)
5. Gololobov V. P., Ishchenko M. G., Tsvir A.V. [Ka-band solid-state transceiver of 50 W output power for pulse radars.] *2nd International radio electronic forum "Applied radio electronics. The state and prospects of development"*. Kharkiv, Ukraine. 2005, vol. 5, pp. 101. (Rus)

6. Khitrovskiy V.A., Berkuta D.N. [Cost-effective coherent transceiver Ka-band mobile radars near field.] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2003, no 3, pp. 33–34. (Rus)
7. Khitrovskiy V.A., Bugay M.V., Korzhik O.A. Ka band coherent transceiver for mobile radars of medium range. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2007, no 2, pp. 11–13. (Rus)
8. Bass I.A., Drucilla A.V., Makovenko S.V., Maltsev S.B., Molchanova S.D., Odnolko A.F., Rudik V.I., Sobolev D.V. [Solid-state transceiver for FMCW radar for precise measurement of the level of the W range.] *Applied radio electronics*. 2008, vol. 7, no. 1, pp. 86–89. (Rus)
9. Karushkin N.F., Dvornichenko P.V., Malysko V.V., Orekhovskiy V.A., Tsvir A.V. [Semiconductor pulse oscillator with electronic frequency switching in millimeter range.] *22nd International Crimean conference "Microwave equipment and telecommunication technologies"*, Ukraine, Sevastopol, 2012, pp. 103–105. (Rus)