

Монолитные интегральные схемы функциональных узлов радиотракта ППМ АФАР X-диапазона на основе арсенид-галлиевых и нитрид-галлиевых технологических процессов

А.В. Кондратенко^{1,2}, Д.С. Брагин¹, Д.Д. Зыков^{1,3}

¹ФГБОУ ВО «ТУСУР», Томск, Россия

²AVK Design Team, Нижний Новгород, Россия

³АО «ПКК Миландр», Зеленоград, Москва, Россия

Аннотация — В докладе представлены результаты разработки различных функциональных узлов радиотракта ППМ АФАР X-диапазона частот в виде монолитных интегральных схем, выполненных на основе GaAs и GaN технологических процессов. По уровню достигнутых параметров разработанные микросхемы не уступают зарубежным аналогам и могут быть предложены широкому кругу отечественных производителей радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова — приемо-передающий модуль, монолитная интегральная схема, схема управления амплитудой и фазой сигнала, малошумящий усилитель, усилитель мощности.

I. ВВЕДЕНИЕ

Как зарубежный, так и отечественный опыт показал возможность реализации радиотракта приемо-передающих модулей (ППМ) АФАР на основе всего трех типов монолитных интегральных схем (МИС): малошумящего усилителя (МШУ), усилителя мощности (УМ) и многофункционального кристалла управления амплитудой и фазой сигнала. Интеграция различных функциональных узлов радиотракта на один кристалл позволяет уменьшить габаритные размеры и увеличить технологичность сборки ППМ, что, в конечном счете, приводит к снижению себестоимости производства. Кроме того, исключение большого числа сварных межсоединений за счет повышения степени интеграции позволяет добиться качественного улучшения параметров ППМ и минимизировать их разброс от модуля к модулю. В то же время по-прежнему востребованными являются такие однофункциональные МИС, как аттенюаторы, фазовращатели и буферные (предварительные) усилители, поскольку их применение может быть более выгодным в сравнении с многофункциональными схемами по ряду причин (использование задела по электронной компонентной базе, конструктивные особенности аппаратуры применения, экономические факторы, и так далее).

В докладе представлены достигнутые результаты в части создания различных функциональных узлов

радиотракта ППМ АФАР X-диапазона частот в виде МИС, выполненных на основе различных GaAs и GaN технологических процессов.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На данный момент мировой рынок электронной компонентной базы (ЭКБ) СВЧ предлагает целый ряд решений, на основе которых могут быть реализованы радиотракты ППМ в различных диапазонах частот. Однако по-прежнему существуют мотивы для заказной разработки ЭКБ в интересах отечественных предприятий-потребителей, среди которых можно выделить следующие: решение проблемы заградительных барьеров от производителей ЭКБ как способа конкурентной и (или) политической борьбы; решение задачи оптимизации технических и экономических показателей комплексного проекта за счет применения специализированной ЭКБ с характеристиками, отличающимися от тех, которыми обладают коммерчески-доступные образцы; удовлетворение потребности заказчиков обладать интеллектуальными правами на разработанную ЭКБ, в частности правами на ее производство; а также ряд других мотивов.

В России имеется ряд предприятий, обладающих технологическими линиями по изготовлению МИС СВЧ. Цель доклада не заключается в оценке уровня их технологической оснащенности и соответствия производственных процессов возможностям создания ЭКБ с параметрами, соответствующими требованиям к современной и перспективной аппаратуре применения. Однако следует отметить тот факт, что на сегодня ни одно отечественное предприятие не предоставляет доступ к своим технологическим процессам для взаимодействия по схеме Foundry в целях создания таких ключевых узлов радиотракта ППМ, как УМ с выходным уровнем сигнала более 5 Вт, а также многофункциональные кристаллы управления амплитудой и фазой сигнала. АО «Светлана-Рост» – единственное предприятие, открыто декларирующее имеющиеся технологические возможности и предлагающее свои процессы для изготовления заказных проектов МИС. Однако сегодня данное

предприятие не имеет предложений по технологическим процессам для создания МИС УМ с обозначенными уровнями выходного сигнала, а возможности сотрудничества в рамках производства и последующих стабильных поставок многофункциональных схем управления амплитудой и фазой сигнала, имеющих большую площадь кристалла и, как следствие, повышенные требования к стабильности технологического процесса, должны быть изучены и взвешены. Подобное положение дел в отечественных микроэлектронных производствах неизбежно подталкивает к использованию зарубежных технологических процессов, на основе которых реализовано большинство заказных проектов коллектива авторов.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

A. МИС малошумящего усилителя

МШУ является неотъемлемым функциональным узлом современных приемных трактов и во многом определяет их качественные показатели. Важно отметить, что помимо требований к таким ключевым характеристикам, как коэффициент усиления и коэффициент шума, к МШУ в составе ППМ АФАР предъявляется ряд других специфических требований, в частности обеспечение согласования по входу усилителя. Согласно [1], оптимальным усилителем для использования в сканирующих АФАР, либо в условиях изменения сопротивления генератора сигнала в широком интервале, является усилитель, у которого условия согласования по максимуму коэффициента передачи по мощности и минимуму коэффициента шума практически совпадают. Кроме того, реализация согласованного входа МШУ ведет к упрощению таблицы амплитудно-фазовых состояний, которой характеризуется ППМ.

В качестве примера решения, разработанного авторами доклада на основе методики совмещенного согласования, на рис. 1 приведены топология кристалла МИС МШУ X-диапазона частот AP505V, реализованного на основе процесса PL15-12, WIN Semiconductors, а также соответствующие частотные зависимости коэффициентов усиления и шума, измеренные для выборки кристаллов на пластине.

Усилитель содержит три каскада на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов с интегрированными цепями согласования, коррекции амплитудно-частотной характеристики, а также ввода и блокировки питания. Во всех каскадах применено классическое решение – последовательная обратная связь в виде высокоомного отрезка линии передачи в истоке транзистора. В первом каскаде величина обратной связи выбиралась исходя из реализации устойчивости и сближения условия оптимального согласования по шуму и условия комплексно-сопряженного согласования на входе транзистора. Выбор величины обратной связи во втором каскаде также диктовался достижением устойчивости, а также необходимостью трансформации входного импеданса

транзистора второго каскада для возможности реализации согласующей цепи между первым и вторым каскадом с минимальным количеством элементов. Введение обратной связи в третьем каскаде позволило добиться равномерности коэффициента усиления и согласования выхода МИС в рабочем диапазоне частот. Для организации требуемого режима по постоянному току применена схема автосмещения. Напряжение питания однополярное 5 В, номинальный ток потребления составляет 75 мА. Выходная мощность при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ составляет порядка 14 дБм.

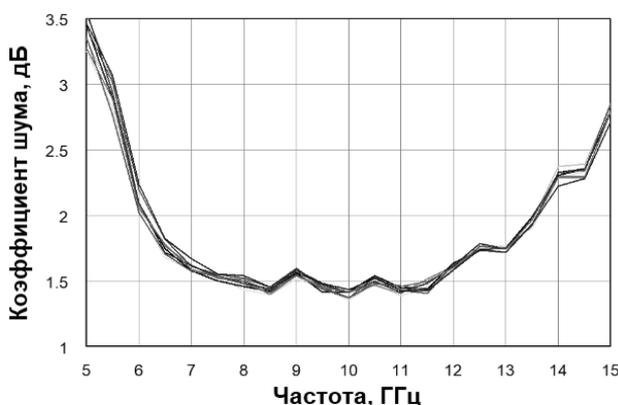
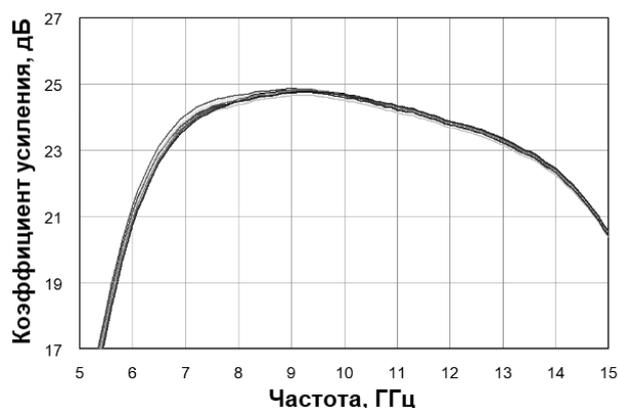
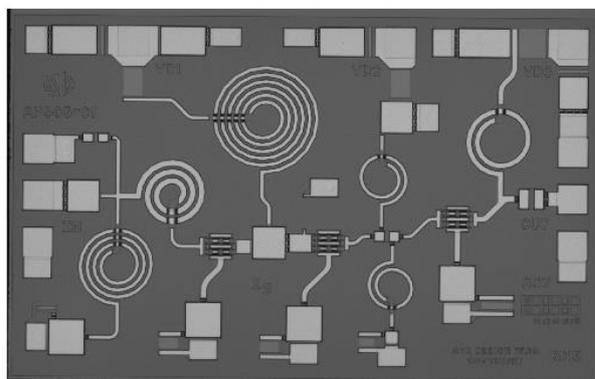


Рис. 1. Топология кристалла AP505V и частотные зависимости параметров разработанного МИС МШУ

В. МИС усилителя мощности

Несмотря на весьма активное развитие методик проектирования УМ высокоэффективных классов, которые в большей степени востребованы в передатчиках телекоммуникационных систем нового поколения, и создание соответствующих схем в монолитном интегральном исполнении, усилители класса АВ по-прежнему являются востребованными в различных приложениях. Предельные уровни выходной мощности в режиме насыщения, которыми характеризуются МИС усилителей на основе GaAs гетероструктурных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов, работающие в X-диапазоне частот, составляют порядка 10...12 Вт. Дальнейшее увеличение выходного уровня в рамках одного кристалла нецелесообразно ввиду значительного роста габаритных размеров кристалла (как следствие, снижения выхода годных и экономической целесообразности применения изделия) и трудоемкости обеспечения, вплоть до невозможности, тепловых режимов работы микросхемы.

В качестве примера заказной разработки на рис. 2 приведена топология МИС 10 Вт УМ X-диапазона частот AP552V, реализованной на основе процесса PP25-21 фабрики WIN Semiconductors, а также соответствующие частотные зависимости выходной мощности и КПД по добавленной мощности в режиме насыщения, измеренные для выборки кристаллов на пластине. Измерения проводились в импульсном режиме работы усилителя (длительность импульса 10 мкс, скважность 100).

Микросхема содержит два каскада с интегрированными цепями согласования, коррекции амплитудно-частотной характеристики, а также ввода и блокировки питания. Суммарная ширина затвора для выходного каскада составляет 19.2 мм (16 транзисторных ячеек в конфигурации 8×150 мкм). Линейный коэффициент усиления 20...23 дБ. Напряжение питания МИС УМ составляет 8 В, ток потребления в режиме большого сигнала до 3.3 А.

С. МИС управления амплитудой и фазой сигнала

Не смотря на появление первых публикаций, посвященных созданию МИС управления амплитудой и фазой сигнала, еще в 90-х годах прошлого столетия, полноценные сведения о различных аспектах создания подобных схем (функциональная архитектура, принципы интеграции различных узлов на один кристалл, подходы к проектированию) появились, начиная с 2000 года. И в первую очередь здесь стоит отметить основополагающий вклад компании M/A-SOM (США). К примеру, концепция построения радиотракта прямо-передающего модуля (ППМ) АФАР на основе трех МИС (усилитель мощности, малошумящий усилитель и схема управления амплитудой и фазой сигнала), была предложена именно специалистами M/A-SOM [2], а впоследствии применена с использованием элементной базы, созданной на основе более современных технологических процессов [3].

Говоря о возможных архитектурах построения МИС управления амплитудой и фазой сигнала, можно выделить четыре основные функциональные схемы, представленные на рис. 3:

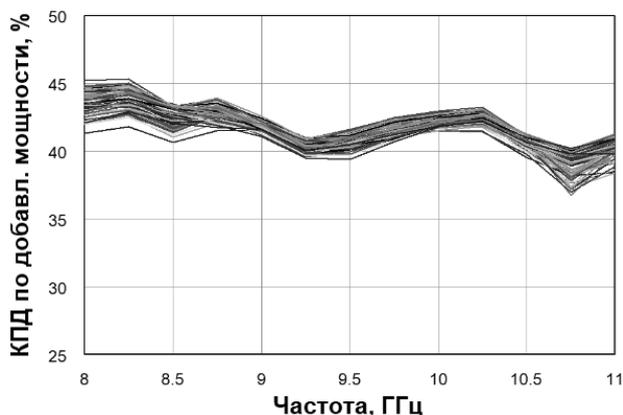
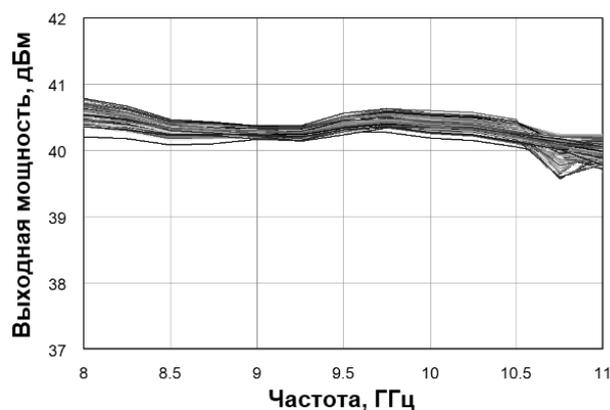
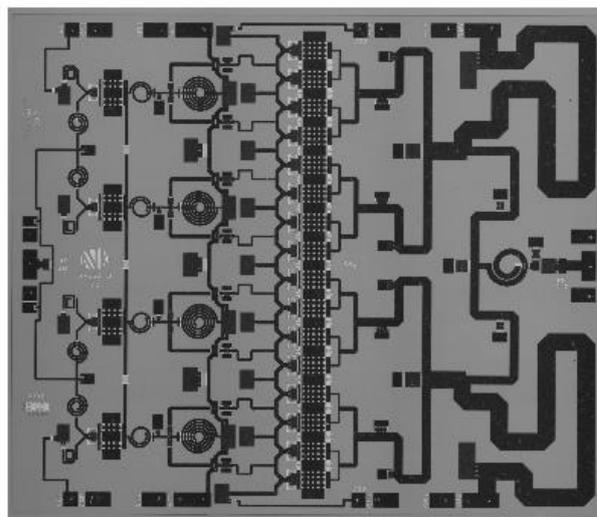
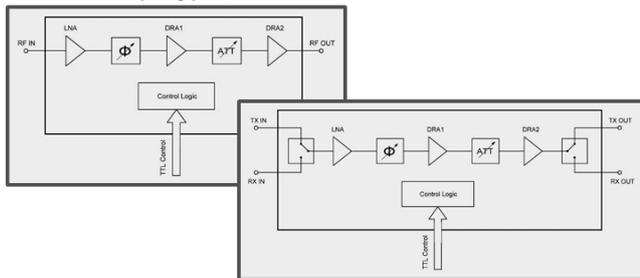


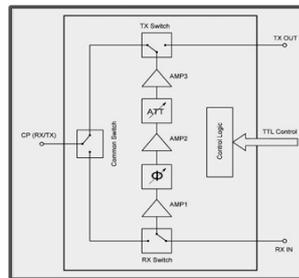
Рис. 2. Топология кристалла AP552V и частотные зависимости параметров МИС 10-Вт усилителя мощности

2-х портовая универсальная конфигурация



4-х портовая конфигурация

3-х портовая конфигурация "Общее плечо"



3-х портовая конфигурация "Частично общее плечо"

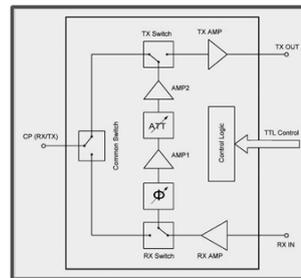


Рис. 3. Основные функциональные реализации МИС управления амплитудой и фазой сигнала

- 2-портовая универсальная конфигурация, которая представляет собой каскадное включение узлов управления, а также ряда усилителей, обеспечивающих требуемую динамику схемы в целом. Данная функциональная реализация подходит для применения, к примеру, в приложениях, где приемный и передающий каналы имеют отдельные антенные системы, или когда антенная система одна, но присутствует требование использования независимых узлов для диаграммообразования в приемном и передающем каналах;
- 4х-портовая реализация схемы, которая представляет собой 2-портовую схему, дополненную двухпозиционными коммутаторами по входу и выходу;
- 3-портовая конфигурация «Общее плечо». По сути, схему можно рассматривать как частный вариант 4х-портовой реализации, когда два порта RX OUT и TX IN на уровне кристалла замкнуты через дополнительный двухпозиционный коммутатор для увеличения развязки приемного и передающего каналов;
- наиболее комплексная, 3х-портовая конфигурация «Частично общее плечо». Здесь уже требуемая динамика трактов достигается путем интеграции на кристалл усилителей RX Amp и TX Amp.

Выбор реализации схемы управления определяется ключевыми системными требованиями (коэффициент шума, уровень интермодуляционных искажений, уровень выходной мощности, сквозное усиление, и т.д.), либо задача может решаться с другой стороны, когда, к примеру, в целях повышения технологичности и надежности изделия производится замена ряда однофункциональных кристаллов на один кристалл управления, и его функциональная схема выбирается из условий максимального соответствия предыдущей архитектуре ППМ.

В качестве примера реализованного проекта, имеющего архитектуру «Частично общее плечо», на рис. 4 приведены топология кристалла, а также

характеристики и ошибки управления (для образца из выборки) многофункциональной МИС управления X-диапазона AP001D, реализованной на основе технологического процесса ED02AH фабрики OMMIC. Выбор 3х-портового решения для данной МИС диктуется как требованием минимизации количества кристаллов, образующих радиотракт ППМ, так и желанием заказчиков получить близкие аналоги для замены зарубежных позиций СНС3014-99F компании UMS (Франция) и XZ1002-BD компании M/A-COM (США), снятой с производства в 2014 году.

Очевидно, что многофункциональная МИС управления характеризуется гораздо большим количеством параметров, нежели представлены на рис. 4. В табл. 1 приведены сводные характеристики разработанной микросхемы, включая режимы работы. Детали типовых схемотехнического и топологического решений, применяемых для создания функциональных узлов микросхемы класса AP001D, представлены в [4].

Таблица 1

Характеристики МИС управления AP001D

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	8...11.5
Коэффициент усиления в режиме приема, дБ, не менее	15
Коэффициент усиления в режиме передачи, дБ, не менее	14
Возвратные потери по входу (Прием/Передача), дБ, не менее	10
Возвратные потери по выходу (Прием/Передача), дБ, не менее	10
Выходная мощность при 1дБ компрессии в режиме приема, дБм, типовое значение	16
Выходная мощность при 1дБ компрессии в режиме передачи, дБм, типовое значение	20
Коэффициент шума в режиме приема, дБ, типовое значение	5.5
Диапазон вносимого фазового сдвига (6 бит, шаг 5.625°), град.	354
Среднеквадратическое значение ошибки вносимого фазового сдвига, град., не более	3

Диапазон вносимого ослабления (5 бит, шаг 0.9 дБ), дБ	27.9
Среднеквадратическое значение ошибки вносимого ослабления, дБ, не более	0.5
Напряжение питания усилительных каскадов, В	5
Напряжение смещения усилительных каскадов, В	минус 5
Напряжение питания драйвера управления, В	минус 5
Стандарт сигналов управления	ТТЛ
Ток покоя по цепи питания усилительных каскадов (Прием/Передача), мА	200/245

D. Дискретно-коммутационные МИС на основе GaN

Вопреки устоявшемуся мнению, что GaN процессы предназначены для реализации УМ, МШУ с повышенной стойкостью к уровню входного

воздействия, а также мощных коммутаторов, французская компания OMMIC позиционирует свой GaN процесс D01GH как универсальный, на основе которого могут быть реализованы ранее упомянутые типы усилителей, а также весь спектр частотно-преобразовательных и управляющих устройств. В настоящее время коллективом авторов доклада уже разработаны функциональные узлы широкополосного аттенуатора и фазовращателя X-диапазона частот на основе процесса OMMIC D01GH, которые на первом этапе будут реализованы в виде отдельных кристаллов для тестирования, после чего интегрированы в состав многофункциональной схемы управления.

Функциональный узел аттенуатора состоит из пяти секций с номинальным вносимым ослаблением 1 дБ,

Кристалл AP001D: 4.00 x 5.10 мм

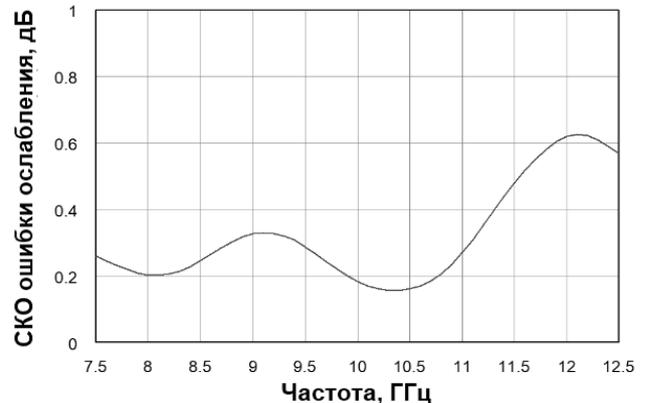
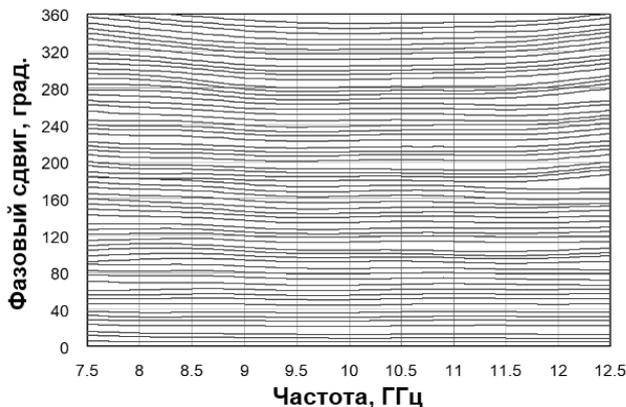
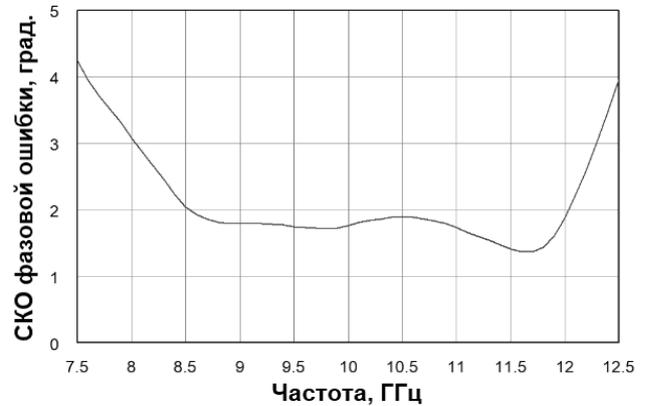
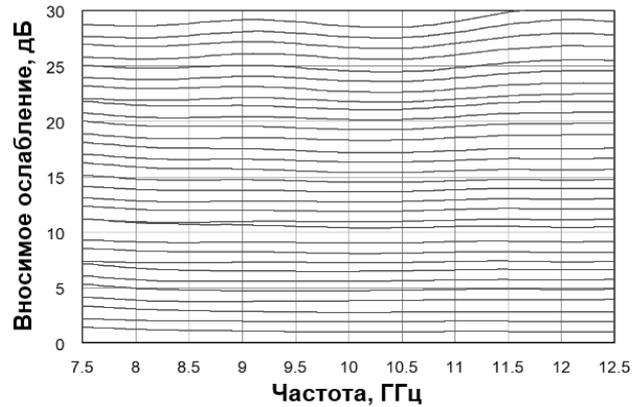
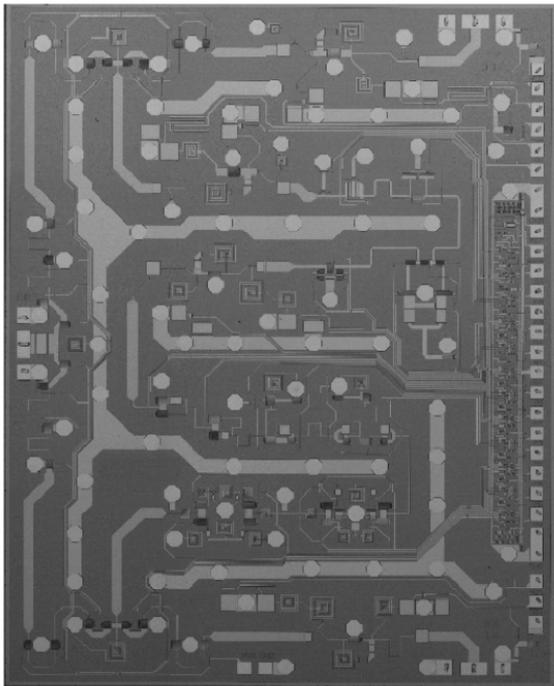


Рис. 4. Топология кристалла AP001D и характеристики управления многофункциональной МИС

2 дБ, 4 дБ, 8 дБ и 16 дБ. Три младшие секции реализованы на основе Т-образных аттенуаторов. Достоинствами данного схемного решения являются малые вносимые потери и компактность при последующей топологической упаковке. Две старшие секции выполнены на основе переключаемых звеньев. Такое схемное решение обеспечивает низкий уровень рассогласования секций по входу и выходу в широкой полосе рабочих частот (0-20 ГГц) и малые неравномерность вносимого ослабления и паразитную фазовую конверсию. Недостатками данного решения являются занимаемая площадь на кристалле и большие вносимые потери. Топология тестового кристалла аттенуатора и результаты моделирования частотных зависимостей характеристик и ошибок управления представлены на рис. 5.

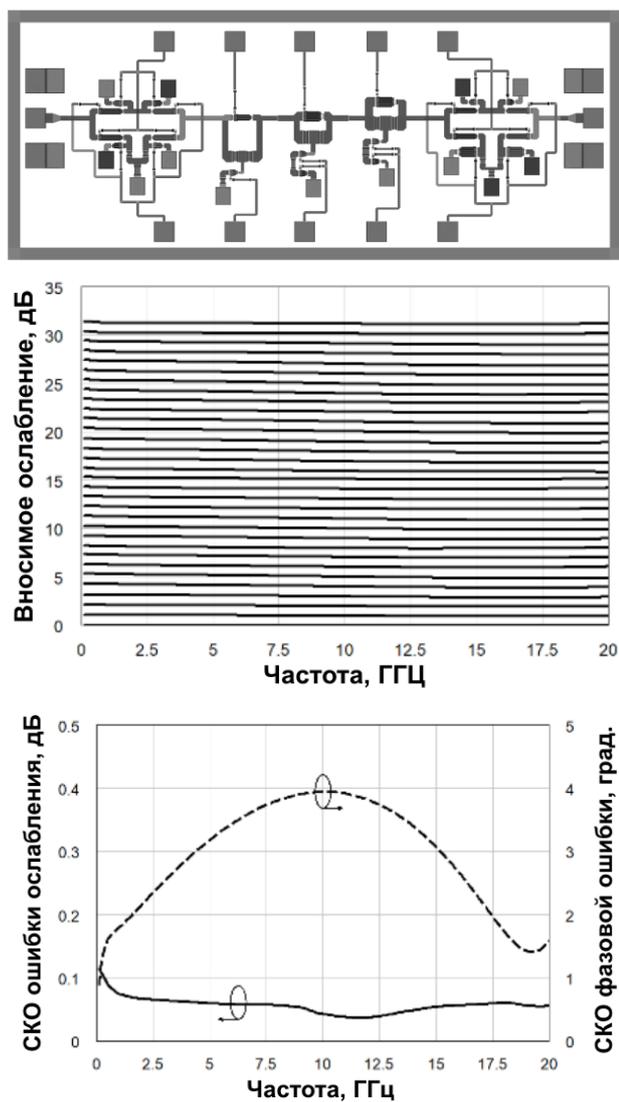


Рис. 5. Топология тестового кристалла и результаты моделирования характеристик аттенуатора

Функциональный узел фазовращателя состоит из шести секций с номинальным вносимым фазовым сдвигом 5.625°, 11.25°, 22.5°, 45°, 90° и 180°. Секции со сдвигом 90° и 180° реализованы на основе

коммутируемых звеньев ФВЧ и ФНЧ 3-го порядка. Основными достоинствами такого схемного решения являются низкая чувствительность вносимого фазового сдвига и амплитудной конверсии к технологическому разбросу и малая неравномерность вносимого фазового сдвига в рабочей полосе частот. Недостатком данного решения являются высокие начальные потери в сравнении с иными решениями. В секциях со сдвигом 5.625° и 11.25° коммутация производится между «вырожденными» ФВЧ и ФНЧ – конденсатором и отрезком линии соответственно, уменьшая вносимые потери. В секциях со сдвигом 22.5° и 45° коммутационные элементы включены в состав фазосдвигающих цепей, что является компромиссным решением по следующим показателям: начальные потери, чувствительность ключевых параметров к технологическому разбросу параметров коммутационных элементов и габаритные размеры секции. Топология тестового кристалла фазовращателя, а также результаты моделирования частотных зависимостей характеристик и ошибок управления представлены на рис. 6.

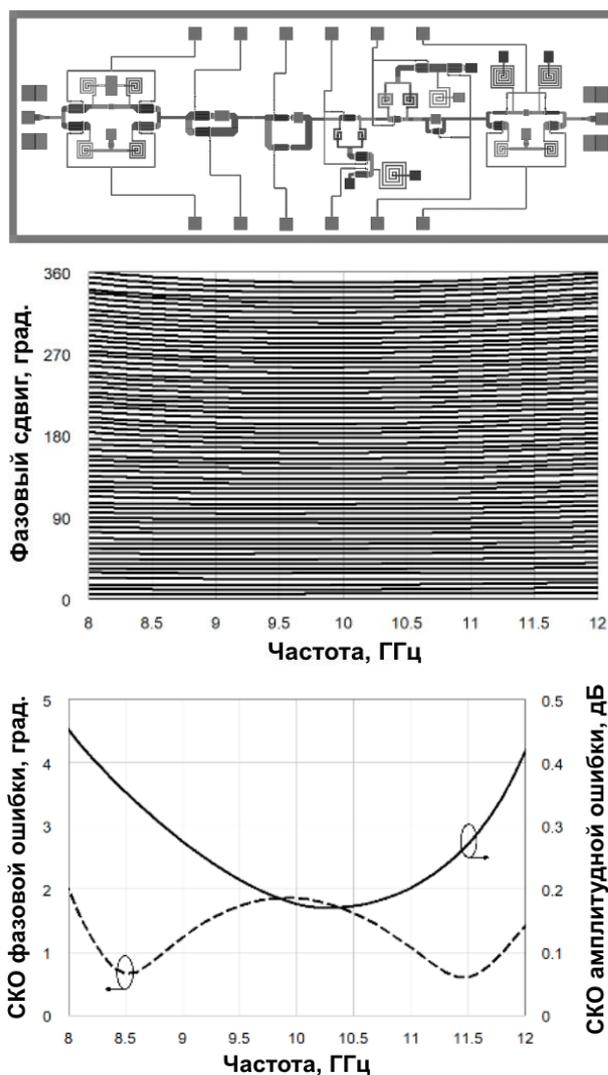


Рис. 6. Топология тестового кристалла и результаты моделирования характеристик фазовращателя

Вносимые потери в опорном состоянии для функциональных узлов аттенюатора и фазовращателя (в полосах рабочих частот) составляют не более 6 дБ и 8 дБ, соответственно. Возвратные потери по входу и выходу для обоих узлов – не менее 11 дБ [5].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подробные технические описания разработанных и изготовленных МИС могут быть предоставлены по запросу. Коллектив авторов открыт для диалога об использовании данных микросхем в интересах отечественных потребителей и готов предложить услуги по разработке иных функциональных узлов СВЧ в интегральном исполнении.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Текшев В.Б., Плигин С.Г. Минимизация изменения коэффициента шума усилителя сканирующей приемной активной фазированной антенной решетки //

Электронная техника. СВЧ-техника. 1994. Вып. 2. С. 19-22.

- [2] E.L. Griffin. X-band GaAs MMIC size reduction and integration // 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2000. Vol. 2. Pp. 709-712.
- [3] K. Golden, A. Bessemoulin, A. Dadello. A 3-chip MMIC solution for X-Band phased array radar // 2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. 2011. Pp. 1-4.
- [4] Гугин А.Ю., Кондратенко А.В. Монолитная интегральная схема управления амплитудой и фазой сигнала X-диапазона частот // Материалы 27-й Международной Крымской конференции. 2017. Т. 1. С. 78-84.
- [5] Досанов А.М., Кондратенко А.В., Брагин Д.С., Зыков Д.Д. Разработка GaN аттенюатора и фазовращателя в монолитном интегральном исполнении // XXV Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР – 2020». 2020. Т. 1.

GaAs and GaN MMIC Functional Blocks for an X-Band AESA T/R Front-End

A.V. Kondratenko^{1,2}, D.S. Bragin¹, D.D. Zykov^{1,3}

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

²AVK Design Team, Nizhny Novgorod, Russia

³JSC «ICC Milandr», Zelenograd, Moscow, Russia

Abstract — Results of development of different GaAs and GaN MMIC functional blocks have been presented. The designed circuits are intended for an X-band AESA T/R front-end, characterized by state-of-the-art parameters, and can be proposed for using by various electronic equipment manufacturers.

Keywords — T/R module, microwave monolithic integrated circuit, core chip, low-noise amplifier, power amplifier.

REFERENCES

[1] Tekshev V.B., Pligin S.G. Minimizacija izmenenija koeficienta shuma usilitelja skanirujushhej priemnoj aktivnoj fazirovannoj antennoj reshetki (Minimizing changes in the noise figure of the amplifier of a scanning receiving active phased array antenna) // Jelektronnaja tehnika. SVCh-tehnika. 1994. V. 2. S. 19-22 (in Russian).

- [2] E.L. Griffin. X-band GaAs MMIC size reduction and integration // 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2000. Vol. 2. Pp. 709-712.
- [3] K. Golden, A. Bessemoulin, A. Dadello. A 3-chip MMIC solution for X-Band phased array radar // 2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. 2011. Pp. 1-4.
- [4] Gugin A. Ju., Kondratenko A. V. Monolitnaja integral'naja shema upravlenija amplitudoj i fazoj signala H-diapazona chastot (An X-band amplitude/phase control MMIC) // Materialy 27-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii. 2017. T. 1. S. 78-84 (in Russian).
- [5] Dosanov A.M., Kondratenko A.V., Bragin D.S., Zykov D.D. Razrabotka GaN atenujatora i fazovrashhatelja v monolitnom integral'nom ispolnenii (Development of GaN attenuator and phase-shifter in monolithic integrated form) // XXV Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija studentov, aspirantov i molodyh uchjonyh «Nauchnaja sessija TUSUR - 2020». 2020. T. 1 (in Russian).