

ДЕПАРТАМЕНТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОСТИ И
ТОРГОВЛИ РФ

Государственная корпорация «Ростех», АО «ОПК»
АО «Российская электроника»,
АО «НПП «ПУЛЬСАР»,
Институт Радиотехники и Электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
РТУ МИРЭА, НИЯУ МИФИ,
Институт Сверхвысокочастотной
полупроводниковой электроники РАН

**ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.
СЛОЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
БЛОКИ РЭА**

*Материалы
XVI научно-технической конференции
посвящённой 70-летию
основания предприятия*

**18-19 октября 2023 г.
г. Москва**

УДК 621.38 : 621.3.049.77 : 621.382.049.77
ББК 32.85 + 32.852

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. СЛОЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ РЭА

Материалы научно-технической конференции

-М.: АО «НПП «Пульсар», 2023. - 169 с.

Сборник составлен по материалам докладов XVI Всероссийской научно-технической конференции "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА" (г. Москва, 18-19 октября 2023 г.).

Материалы даны в авторской редакции.

Ответственные за выпуск:

Синкевич В.Ф., Каевицер Е.В., Шарапежникова Н.И.

Подписано в печать 10.10.2023
Формат 60x84¹/₁₆. Бумага офсетная № 1 - 65 гр.
Печ. л. – 13,38
Тираж 200 экз. Заказ № 94

Отпечатано в типографии АО «НПП «Пульсар»
г.Москва, Окружной проезд, д. 27

© АО «НПП «ПУЛЬСАР», 2023 г.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА МИС СВЧ В

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»

*А.А. Кищинский, А.В. Кондратенко, Д.А. Шишкин, П.С. Сорвачев,
В.М. Миннебаев, С.В. Миннебаев*
АО «Микроволновые системы», г. Москва

В докладе представлены примеры из практики АО «Микроволновые системы» в части разработки и производства монолитных интегральных схем СВЧ на основе GaAs и GaN.

В настоящее время мировой рынок электронной компонентной базы (ЭКБ) предлагает широкую номенклатуру монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ, которые могут быть использованы для построения радиотрактов систем и комплексов различного назначения. Однако по-прежнему существуют мотивы для разработки собственных решений, среди которых можно отметить: решение проблемы заградительных барьеров от производителей и поставщиков МИС СВЧ как способа конкурентной и (или) политической борьбы; решение задачи оптимизации технических и экономических показателей комплексного проекта за счет применения специализированных МИС с характеристиками, отличающимися от тех, которыми обладают коммерчески-доступные образцы; удовлетворение потребности обладать интеллектуальными правами на применяемую ЭКБ; а также другие мотивы.

В АО «Микроволновые системы» задачи разработки СВЧ МИС не являются эпизодическими, ими занимается отдельное подразделение на постоянной основе. Кроме того, предприятие способно самостоятельно решать задачи проведения зондовых измерений, восстановления моделей активных и пассивных базовых элементов применяемых техпроцессов, организации визуального и электрического контроля серийно выпускаемых микросхем, что позволяет говорить о реализации и внедрении сквозного цикла от проектирования до внедрения в серийное производство.

На сегодняшний день портфолио предприятия содержит такие функциональные узлы в интегральном исполнении как диапазонные и широкополосные усилители мощности и малошумящие усилители, а также схемы управления амплитудой и фазой сигнала, как в однофункциональном, так и во многофункциональном исполнении.

Первым примером, демонстрирующим компетенции предприятия в разработке МИС СВЧ, может служить линейка серийно выпускаемых многофункциональных схем X-диапазона частот, параметры которых приведены в таблице 1.

Основные параметры МИС MSP003D, MSP012D и MSP013D

Наименование параметра, единица измерения	Значение		
	MSP003D	MSP012D	MSP013D
Диапазон рабочих частот, ГГц	8-11,5	8-11,5	8-11,5
Коэффициент усиления в режиме приема, дБ, не менее	18	минус 3	минус 2,5
Коэффициент усиления в режиме передачи, дБ, не менее	17		15
Возвратные потери по входу (Прием/Передача), дБ, не менее	11	14	14
Возвратные потери по выходу (Прием/Передача), дБ, не менее	12	14	14
Вых. мощность при 1дБ компрессии (режим приема), дБм, тип. знач.	17	21	20
Вых. мощность при 1дБ компрессии (режим передачи), дБм, тип. знач.	20		15
Коэффициент шума в режиме приема, дБ, тип. знач.	4,5	–	–
Шаг вносимого фазового сдвига, град.	5,625	1,40625	–
Диапазон вносимого фазового сдвига, град.	354	4,2	–
СКО ошибки вносимого фазового сдвига, град., не более	2	0,8	–
Шаг вносимого ослабления, дБ	0,9	0,5	–
Диапазон вносимого ослабления, дБ	27,9	3,5	–
СКО ошибки вносимого ослабления, дБ, не более	0,5	0,2	–
Напряжение питания усилительных каскадов, В	5	–	5
Напряжение смещения усилительных каскадов, В	минус 5	–	–
Напряжение питания драйвера управления, В	минус 5	минус 5	минус 5
Стандарт сигналов управления	ТТЛ	ТТЛ	ТТЛ
Ток покоя по цепи питания каскадов усиления (Прием/Передача), мА	200/275	–	0/90
Габаритные размеры кристалла, мм ²	4,0×5,1	2,3×1,5	2,3×1,5

Основной векторный модулятор MSP003D представляет собой 3х-портовую МИС, содержащую в своем составе три двухпозиционных коммутатора, обеспечивающих переключение приемного и передающего режимов; малошумящий усилитель (МШУ) на входе приемного канала; 6-разрядный фазовращатель, 5-разрядный аттенюатор, а также два буферных усилителя в общем плече; предварительный усилитель мощности (ПУМ) на выходе передающего канала; цепи стабилизации затворного смещения активных элементов усилителей и цифровой драйвер управления.

Функциональный узел фазовращателя содержит в своем составе шесть секций с номинальным вносимым фазовым сдвигом $5,625^{\circ}$, $11,25^{\circ}$, $22,5^{\circ}$, 45° , 90° и 180° . Секции « 90° » и « 180° » выполнены на основе коммутируемых звеньев ФВЧ и ФНЧ третьего порядка. Основным достоинством данного схемного решения являются малая неравномерность вносимого фазового сдвига в рабочей полосе частот, а также низкая чувствительность ключевых параметров (вносимого фазового сдвига и паразитной амплитудной конверсии) к технологическим вариациям параметров коммутационных элементов. Основным недостатком схемного решения – высокие начальные потери, обусловленные коммутаторами на входе/выходе секций, в сравнении с другими реализациями. В секциях « $5,625^{\circ}$ » и « $11,25^{\circ}$ » коммутация производится между «вырожденными» ФВЧ и ФНЧ – конденсатором и катушкой индуктивности соответственно. Благодаря такому схемному решению удалось снизить вносимые потери. В секциях « $22,5^{\circ}$ » и « 45° » коммутационные элементы являются составными частями фазосдвигающих цепей. Данное решение является компромиссным по таким показателям как чувствительность ключевых электрических характеристик к технологическому разбросу параметров активных элементов, уровень начальных потерь и габаритные размеры секции.

Функциональный узел аттенюатора содержит в своем составе пять секций с номинальным вносимым ослаблением 0,9 дБ, 1,8 дБ, 3,6 дБ, 7,2 дБ и 14,4 дБ. Для снижения вносимых потерь узла в опорном состоянии старшие секции («7,2 дБ» и «14,4 дБ»), вносящие основной вклад в паразитную фазовую конверсию аттенюатора, минимизации которой было уделено особое внимание в процессе проектирования, были реализованы без использования двухпозиционных коммутаторов на входе/выходе секций. Коммутационные элементы были интегрированы «внутри» секций с включением дополнительных элементов (отрезков линий или катушек индуктивности), компенсирующих фазовые набег, возникающие при переключении состояний.

МШУ на входе приемного канала и первый буферный усилитель общего плеча выполнены по однокаскадной схеме с применением отрицательной параллельной обратной связи. Данное решение позволило реализовать требования по коэффициенту шума и динамике каскадов при минимальной неравномерности коэффициента усиления в рабочей полосе частот и низком КСВн входа/выхода. Второй буферный усилитель общего плеча и ПУМ на выходе передающего канала также выполнены по однокаскадной схеме, однако без использования параллельной обратной связи. По сути, это явилось компромиссным решением между чувствительностью каскадов к технологическому разбросу параметров элементов, реализацией выходных согласующих цепей с заданной токовой нагрузкой и ограниченной площадью для упаковки каскадов на общий кристалл.

Дополнительный векторный модулятор MSP012D представляет собой 2х-портовую МИС, содержащую в своем составе 2-разрядный фазовращатель, 3-разрядный аттенюатор, а также цифровой драйвер управления. Секции с номинальным вносимым фазовым сдвигом $1,40625^0$ и $2,8125^0$, а также секции с номинальным вносимым ослаблением 0,5 дБ, 1,0 дБ и 2,0 дБ реализованы на основе тех же схемотехнических решений, которые были применены для МИС основного векторного модулятора. Назначение MSP012D – получение дополнительных степеней свободы в вопросе диаграммообразования, а также реализация амплитудной/фазовой коррекции каждого канала в отдельности.

Двунаправленный усилитель MSP013D представляет собой 2х-портовую МИС, содержащую в своем составе два двухпозиционных коммутатора, а также двухкаскадный усилитель в одном из плеч, которые совместно обеспечивают прохождение СВЧ сигнала либо в одном направлении с коэффициентом усиления порядка 15 дБ, либо в противоположном направлении с ослаблением порядка 2,5 дБ. Для переключения режимов работы, как и в микросхемах векторных модуляторов, на кристалл интегрирован цифровой драйвер управления параллельного типа.

Второй пример из практики АО «Микроволновые системы», это линейка дискретных широкополосных фазостабильных аттенюаторов, основные параметры которых приведены в таблице 2.

Основные параметры разработанных МИС аттенюаторов

Наименование параметра, единица измерения	Значение				
	MSP101D	MSP106V	MSD107V	MSD108V	MSD109V
Рабочий диапазон частот, ГГц	0,1-20	0,1-20	6-9	4-18	7,4-11
Вносимые потери (опорное сост.), не более, дБ	5,5	3,2	0,6	1,0	0,6
Коэффициент отражения от вх/вых, не более, дБ	-11	-15	-20	-17	-19
Входная мощность при 1дБ компрессии, дБм	21 ¹⁾	20 ²⁾	20	18	20
Разрядность схемы, бит	5	1	1	1	1
Диапазон вносимого ослабления, дБ	27,9	20	20	20	20
Шаг вносимого ослабления, дБ	0,9	20	20	20	20
Ошибка вносимого ослабления, не более, дБ	1,0	1,0	0,4	0,5	0,4
СКО ошибки вносимого ослабления, не более, дБ	0,5	–	–	–	–
Паразитная фазовая конверсия, не более, град.	14	7	19	38	23
СКО паразитной фазовой конверсии, град	4,5	–	–	–	–
Сигналы управления, В	ТТЛ	0/-3,3	0/5	0/5	0/5
Напряжение питания, В	-5	–	–	–	–

Примечания: ¹⁾ Минимальное значение параметра в диапазоне 2-20 ГГц;
²⁾ Минимальное значение параметра в диапазоне 1-20 ГГц.

В микросхемах MSP101D и MSP106D в качестве коммутационных элементов используются транзисторы с затвором Шоттки, работающие в режиме управляемого сопротивления канала. В сравнении с PIN-диодами их можно характеризовать такими преимуществами как более высокое быстродействие, малая мощность потребления по цепям управления, более простая реализация драйверов (преобразователей уровней) управления, а также возможность интеграции в составе многофункциональных интегральных схем.

Для тех приложений, в которых от аттенюатора требуются минимальные потери в опорном состоянии, а также не предъявляются жесткие требования к фазовой стабильности в широкой полосе частот, в качестве коммутационных элементов могут быть использованы PIN-диоды. В данном случае стоит отметить и экономический эффект – при переходе от достаточно универсальных рHEMT/HEMT технологий к диодным процессам падение стоимости услуг Foundry-партнеров может достигать 3-5 раз, что соответствующим образом сказывается на себестоимости кристаллов собственной разработки. Примером из портфолио АО «Микроволновые системы» может служить линейка 1-разрядных управляемых аттенюаторов MSD10xV с вносимым ослаблением 20 дБ, реализованных на основе GaAs PIN-диодного процесса по схеме Foundry. Узкополосные литеры MSD107V и MSD109V представляют из себя коммутируемые T-образные секции, в то же время широкополосную литеру MSD108V оказалось более выгодным реализовать на основе П-образной секции ослабления.

Еще одним примером, демонстрирующим портфолио разработанных МИС СВЧ, являются микросхемы усилителей мощности. В настоящее время продолжается тенденция к замещению GaAs усилительных приборов на новые интегральные

схемы на основе GaN, благодаря чему возникает ряд преимуществ, как на уровне отдельно рассматриваемого функционального узла (возможность реализации большей удельной выходной мощности активных элементов за счет высоких пробивных напряжений; повышение КПД за счет более высокого выходного импеданса активных элементов и, как следствие, упрощения структуры согласующих и трансформирующих цепей; повышения надежности за счет возможности работы при высоких температурах перехода), так и на системном уровне (к примеру, возможность работы при напряжениях питания, близких к напряжению первичного источника, что позволяет ослабить требования к вторичным источникам, повысить их эффективность и, как следствие, увеличить системный КПД).

Кроме того, 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 40...41 дБм. Дальнейшее увеличение выходного уровня не целесообразно 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. Переход к GaN-базису позволяет реализовать компактные решения, характеризующиеся удобством применения и экономической эффективностью.

В таблице 3 приведены основные параметры для разработанных GaN МИС усилителей мощности X-диапазона частот MSP550V и MSP560V.

Таблица 3

Основные параметры МИС MSP550V и MSP560V

Наименование параметра, единица измерения	Значение	
	MSP560V	MSP550V
Диапазон рабочих частот, ГГц	8,5-11	8,5-11
Коэффициент усиления в режиме малого сигнала, дБ, не менее	19	27
Выходная импульсная мощность, дБм, типовое значение	40	44
КПД по добавленной мощности, %, типовое значение	35	40
Напряжение питания усилительных каскадов, В	24	28
Габаритные размеры кристалла, мм ²	3,0×1,25	3,0×3,0

Обе микросхемы выполнены по двухкаскадной схеме, при этом MSP560V дополнительно характеризуется наличием встроенной функции контроля уровня выходной мощности.

Представленные примеры МИС составляют лишь часть портфолио АО «Микроволновые системы», которое продолжает пополняться новыми разработками на регулярной основе. Все имеющиеся решения в первую очередь предназначены для собственного применения, однако могут быть предложены и сторонним потребителям.