УДК 621.382.2/.3

МИС векторного модулятора Ku-диапазона: особенности схемотехнической и топологической реализации

А.В. Кондратенко[1], П.С. Сорвачев[1], А.С. Щербаков[2]

[1]Обособленное подразделение АО «Микроволновые системы» в г. Нижний Новгород
[2]Обособленное подразделение АО «Микроволновые системы» в г. Саратов

Аннотация: в докладе представлены некоторые особенности схемотехнической и топологической реализации монолитной интегральной схемы управления амплитудой и фазой сигнала Ku-диапазона частот и результаты измерения электрических параметров опытных образцов. Проект выполнен на основе технологического процесса 0,15 мкм GaAs pHEMT. Драйвер управления последовательно-параллельного типа в составе микросхемы реализован на основе опциональных нормально открытых и нормально закрытых транзисторов с длиной затвора 0,5 мкм.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, транзистор с высокой подвижностью электронов, векторный модулятор, параметры рассеяния, последовательно-параллельный драйвер управления, схема стабилизации затворного смещения, технологический процесс GaAs pHEMT.

1. Введение

Разработка собственной электронной компонентной базы (ЭКБ) высокой степени интеграции для применения в приемо-передающих модулях (ППМ) позволяет решить важную задачу оптимизации технических и экономических показателей комплексного проекта.

Проектирование многофункциональных монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона частот является сложной и трудоемкой задачей, для решения которой необходимо обладать компетенциями в различных областях. В связи со сложностью и порой невозможностью на этапе расчета учесть все нюансы, например, как технологический разброс параметров на пластине и паразитное электромагнитное влияния друг на друга топологически находящихся рядом функциональных узлов тракта, необходимо изготовление опытных образцов и измерение их характеристик. После анализа полученных данных выделяются важные особенности, позволяющие улучшить параметры разрабатываемой МИС, и после взвешивания всех за и против, при необходимости, выполняется корректировка проекта.

В докладе представлены некоторые особенности разработки GaAs МИС управления амплитудой и фазой Ku-диапазона частот MSP010D. Разработка велась в интересах собственных подразделений, занимающихся проектированием и производством радиоэлектронных узлов, модулей и систем.

2. Краткое описание о особенности разработанной микросхемы

МИС управления амплитудой и фазой сигнала MSP010D была разработана и изготовлена на основе технологического процесса, в основе которого лежат нормально открытые GaAs транзисторы с высокой подвижностью электронов, имеющие длину затвора 0,15 мкм. Векторный модулятор Ku-диапазона частот представляет собой трехпортовую МИС, содержащую в своем составе: систему коммутаторов, обеспечивающих переключение режимов приема и передачи; малошумящий усилитель на входе приемного канала; 6-разрядный аттенюатор с номинальным шагом вносимого ослабления 0,5 дБ; 6-разрядный фазовращатель с номинальным шагом

вносимого фазового сдвига 5,625°; два буферных усилителя в общем плече; предварительный усилитель мощности на выходе передающего канала; 24-разрядный последовательно-параллельный драйвер управления, обеспечивающий загрузку данных для приемного и передающего режимов работы за один цикл; цепи стабилизации затворного смещения активных элементов усилителей.

Измерение электрических параметров проводилось в специально разработанной оснастке. Микросхема показала работоспособность после первой итерации изготовления. Анализ и сравнение измеренных частотных зависимостей с расчетом позволил оценить правильность методологии проектирования и выявить ряд особенностей.

Все усилительные каскады в составе МИС выполнены по однокаскадной схеме с применением двух транзисторов, включенных в стек. Первый транзистор включен по схеме с общим истоком, а второй - с общим затвором. Подобное решение позволило получить от одного каскада в рабочем диапазоне частот коэффициент усиления более 10 дБ и за счет удвоенного напряжения питания реализовать выходную мощность при 1 дБ компрессии коэффициента усиления порядка 19 дБм. Все каскады усиления реализованы с применением отрицательной параллельной обратной связи, что позволяет добиться минимальной неравномерности коэффициента усиления в рабочей полосе частот и низкого КСВН входа/выхода.

Для стабилизации затворного смещения активных элементов усилителей, включенных по схеме с общим истоком, и, как следствие, для снижения зависимости СВЧ параметров усилителей от технологического разброса напряжения отсечки транзисторов, температурного режима работы и внешнего напряжения смещения на кристалл интегрированы схемы генератора затворного смещения [1]. Эффективность используемой схемы подтверждается по результатам моделирования частотных характеристик взятого отдельно из проекта малошумящего усилителя без схемы стабилизации затворного смещения и с ее использованием при различных значениях напряжения отсечки транзистора от минус 1,25В до минус 0,75В и температуры окружающей среды от минус 60°С до 80°С (рисунок 1).

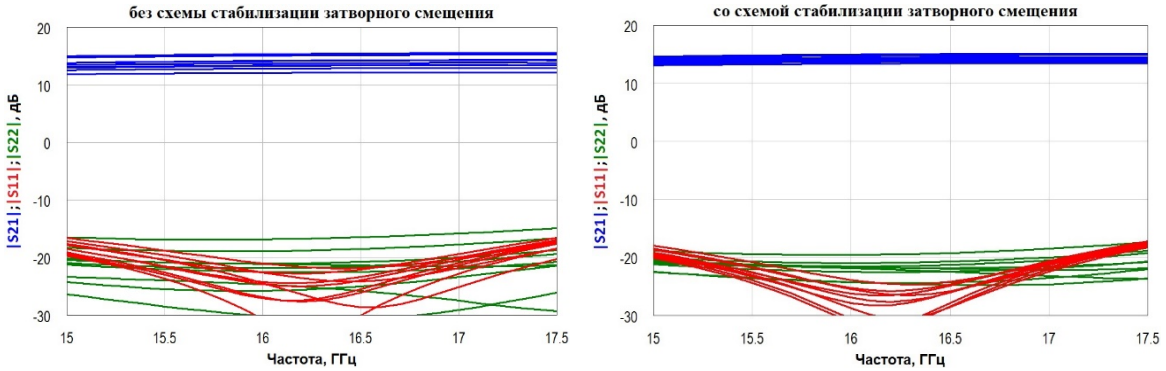

Рисунок 1. Расчетные частотные характеристики при вариациях напряжения отсечки и температуры.

Использование схемы стабилизации затворного смещения позволяет минимизировать разброс коэффициента усиления практически в 2 раза при незначительной занимаемой площади самой схемой на кристалле (300х250 мкм^2).

Для ППМ Ku-диапазона частот имеется очень небольшой выбор доступной СВЧ ЭКБ, учитывая малое межканальное расстояние в модуле (ориентировочно 8-10 мм). Выпускаемые китайскими компаниями GaAs МИС управления амплитудой и фазой Ku-диапазона частот между собой все близки по архитектуре, размерам и электрическим параметрам. Недостатком всех конструкций является большой

поперечный размер кристалла (порядка 5 мм) и высокая стоимость. Одна из причин разработки и освоения производства собственного векторного модулятора Ku-диапазона частот – это возможность оптимизировать МИС по архитектуре и параметрам. Таким образом, важной конструктивной особенностью МИС MSP010D является необходимость получения поперечного размера кристалла как можно меньшего размера для комфортного расположения в канале. Однако, эта вынужденная необходимость может оказывать и отрицательный эффект в виде недостаточной развязки между соседними частями СВЧ тракта. По измеренным частотным зависимостям в режимах работы на прием и передачу заметно различное поведение характеристик, соответствующих включению секций аттенюатора и фазовращателя. Данные зависимости для основных состояний аттенюатора и фазовращателя в отдельности приведены на рисунке 2.

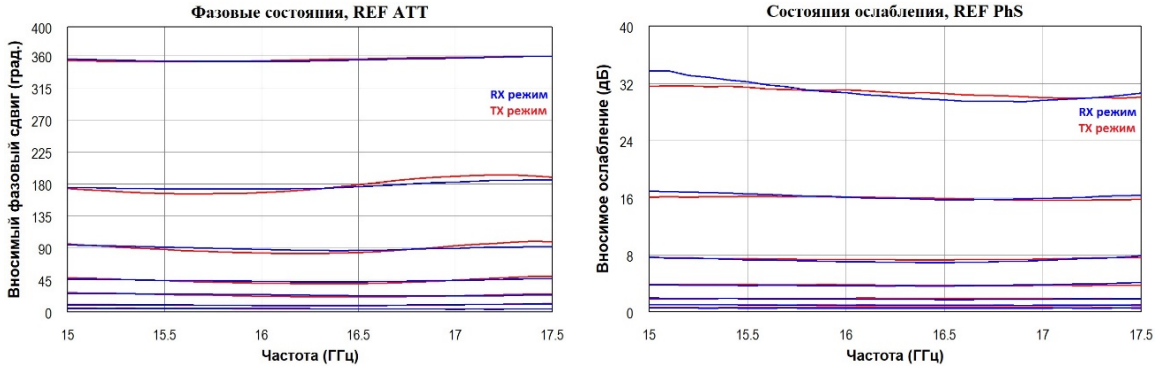

Рисунок 2. Различное поведение характеристик в режимах работы на прием и передачу

Причина такого поведения – это изменяющиеся условия паразитного взаимодействия секций аттенюатора и фазовращателя с прочими функциональными узлами тракта. Аттенюатор на МИС расположен рядом с приемным каналом, а фазовращатель прилегает к передающему плечу. Соответственно, при работе МИС в приемном режиме наибольшему паразитному влиянию подвержен аттенюатор, а при работе в передающем режиме фазовращатель.

Паразитное влияние передающего плеча на функциональный узел фазовращателя было подтверждено результатами моделирования. На рисунке 3 изображены частотные зависимости среднеквадратических значений ошибок вносимого фазового сдвига для трех случаев: без учета паразитного влияния передающего тракта; с учетом паразитного влияния передающего тракта; с учетом паразитного влияния передающего канала и наличия дополнительных экранирующих полигонов GND.

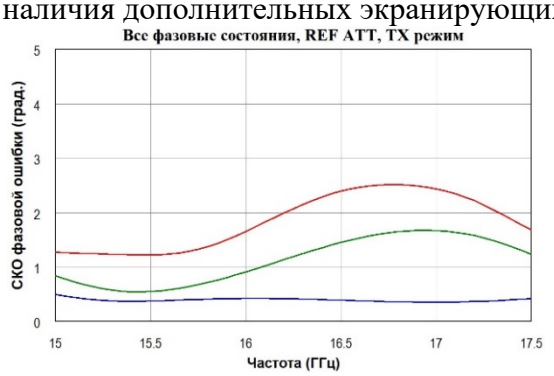

Рисунок 3. Среднеквадратические значения ошибок вносимого фазового сдвига (синяя кривая – моделирование без учета паразитного влияния выходной части тракта; красная кривая – с учетом паразитного влияния выходной части тракта; зеленая кривая – с учетом паразитного влияния выходной части тракта и наличия дополнительных экранирующих полигонов GND)

Моделирование качественно показало уменьшение значения среднеквадратической ошибки вносимого фазового сдвига в передающем режиме работы с дополнительными экранирующими полигонами GND между функциональным узлом фазовращателя и передающим каналом.

Еще к одной важной конструктивной особенности можно отнести расположение и последовательность следования функциональных узлов на кристалле. В первом варианте прорисовки топологии на расчетном уровне была обнаружена паразитная петля, приводящая к неработоспособности функционального узла аттенюатора в приемном режиме работы МИС. В результате повторной прорисовки топология первого буферного усилителя общего плеча была размещена между секциями аттенюатора. На рисунке 4 изображены топологии МИС и частотные зависимости управляющих амплитудных характеристик функционального узла аттенюатора для приемного режима работы до коррекции топологии и после.

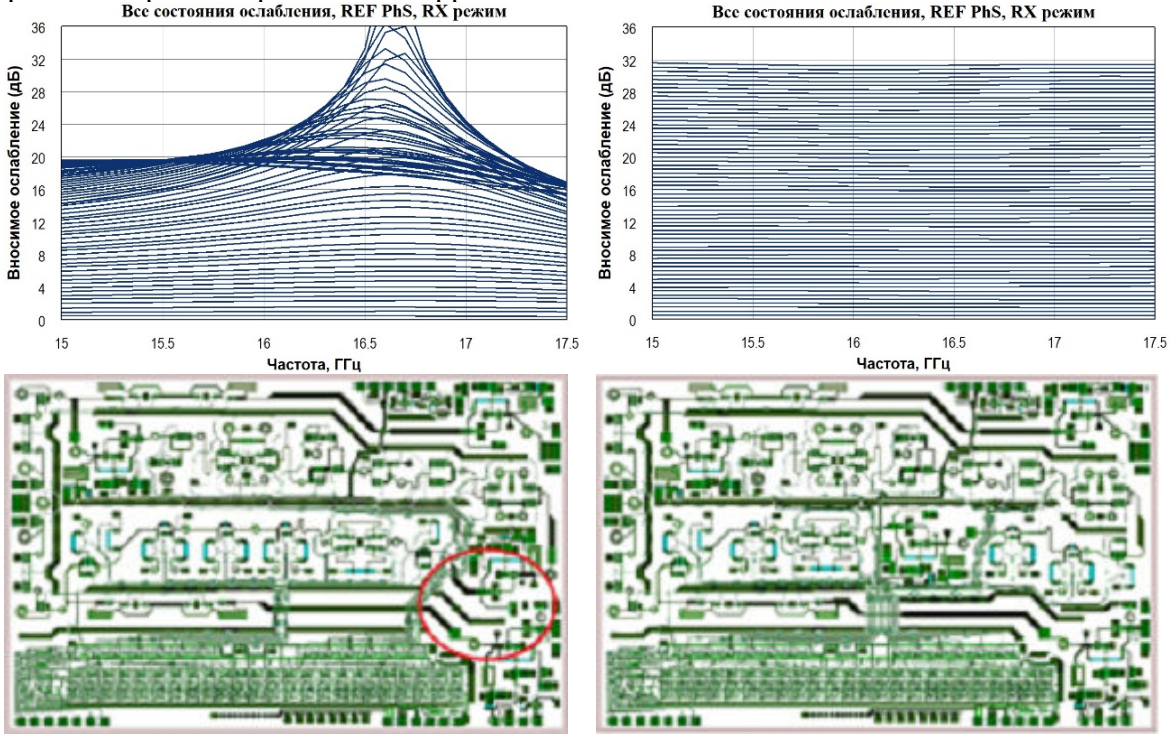

Рисунок 4. Топологии МИС и частотные зависимости управляющих амплитудных характеристик функционального узла аттенюатора для приемного режима работы до коррекции топологии (слева) и после (справа)

К одной из функциональных особенностей разработанной МИС можно отнести интеграцию на кристалл последовательно-параллельного драйвера управления, схемотехника которого ограничена рядом логических элементов. Использование данных элементов позволяет реализовать D-триггеры, из которых формируются регистры сдвига и хранения, выполняющие главную функцию – преобразование кода из последовательного в параллельный [2,3]. В интересах собственных подразделений была осуществлена дополнительная функция - в МИС MSP010D имеется выход переноса, позволяющий осуществить загрузку данных в последовательно соединенные N количество МИС за один цикл. Такое решение позволит сэкономить место в разрабатываемом модуле за счет исключения ряда линий управляющих сигналов.

Основные измеренные электрические параметры МИС MSP010D приведены в таблице 1.

Таблица 1. Измеренные электрические параметры разработанной МИС

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	15…17,5
Коэффициент усиления в режиме приема, дБ, не менее	19,4
Коэффициент усиления в режиме передачи, дБ, не менее	18,4
Возвратные потери по входу (Прием/Передача), дБ, не менее	13
Возвратные потери по выходу (Прием/Передача), дБ, не менее	9
Выходная мощность при 1дБ компрессии в режиме приема, дБм, тип. знач.	17
Выходная мощность при 1дБ компрессии в режиме передачи, дБм, тип. знач.	19
Диапазон вносимого фазового сдвига (6 бит, шаг 5,625º), град.	354
СКО ошибки вносимого фазового сдвига, град., не более	3(RX)(1) 4,5(TX)(1)
Диапазон вносимого ослабления (6 бит, шаг 0,5 дБ), дБ	31,5
СКО ошибки вносимого ослабления, дБ, не более	0,9(RX)(1) 0,5(TX)(1)
Напряжение питания усилительных каскадов, В	8
Ток покоя по цепи питания усилительных каскадов (Прием/Передача), мА	160/160
Напряжение смещения усилительных каскадов, В	минус 3,3
Ток потребления по цепям смещения усилительных каскадов, мА	10
Напряжение питания драйвера управления, В	минус 3,3
Ток потребления по цепи питания драйвера управления, мА	34
Стандарт сигналов управления	ТТЛ
Времена переключения основных амплитудных и фазовых состояний, нс, не более	35

(1) Среднеквадратические значения ошибок управления при возможных состояниях фазовращателя и аттенюатора отличаются для разных режимов работы МИС.

3. Заключение

В докладе представлены некоторые особенности схемотехнической и топологической реализации МИС управления амплитудой и фазой Ku-диапазона частот MSP010D, а также результаты измерений основных электрических параметров. По уровню достигнутых параметров микросхема может конкурировать с зарубежными аналогами. После выхода на серийное производство МИС может быть предложена широкому кругу потребителей, готовых сотрудничать с АО «Микроволновые системы» как с поставщиком ЭКБ СВЧ.

Список литературы

1. De Hek A. P., Busking E. B. On-chip active gate bias circuit for MMIC amplifier applications with 100% threshold voltage variation compensation //2006 European Microwave Conference. – IEEE, 2006. – С. 1751-1754.
2. Wang K. et al. Design of a low-insertion-phase-shift MMIC attenuator integrated with a serial-to-parallel converter //IEICE Electronics Express. – 2017. – Т. 14. – №. 20. – С. 20170924-20170924.
3. Bentini A. et al. Design and realization of GaAs digital circuit for mixed signal MMIC implementation in AESA applications //International Journal of Microwave Science and Technology. – 2011. – Т. 2011.