

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

А.В. Кондратенко¹, П.С. Сорвачев¹, А.С. Щербаков²

¹Обособленное подразделение АО «Микроволновые системы» в г. Нижний Новгород

²Обособленное 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 рНЕМТ. 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 рНЕМТ.

1. Введение

Разработка собственной электронной компонентной базы (ЭКБ) высокой степени интеграции для применения в приеме-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 особенностях 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 $5,625^\circ$; 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°C до 80°C (рисунок 1).

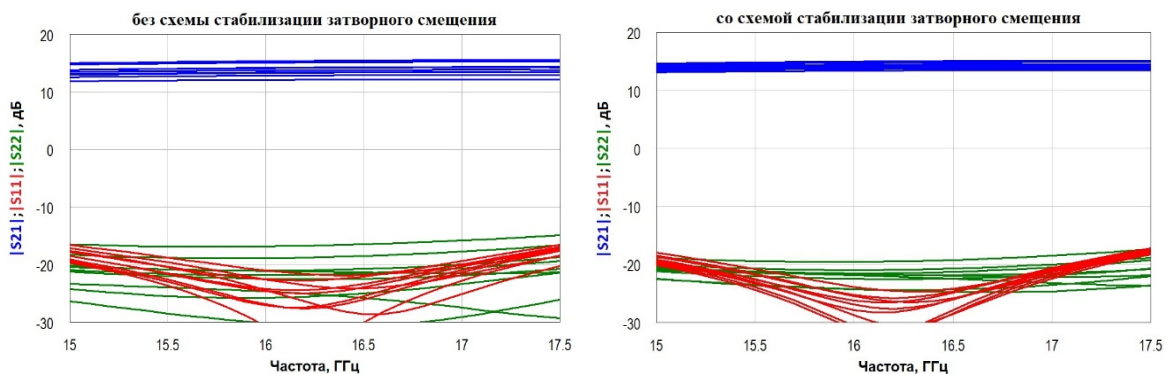


Рисунок 1. Расчетные частотные характеристики при вариациях напряжения отсечки и температуры.

Использование схемы стабилизации затворного смещения позволяет минимизировать разброс коэффициента усиления практически в 2 раза при незначительной занимаемой площади самой схемой на кристалле ($300 \times 250 \text{ мкм}^2$).

Для ППМ Ку-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 Ку-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.

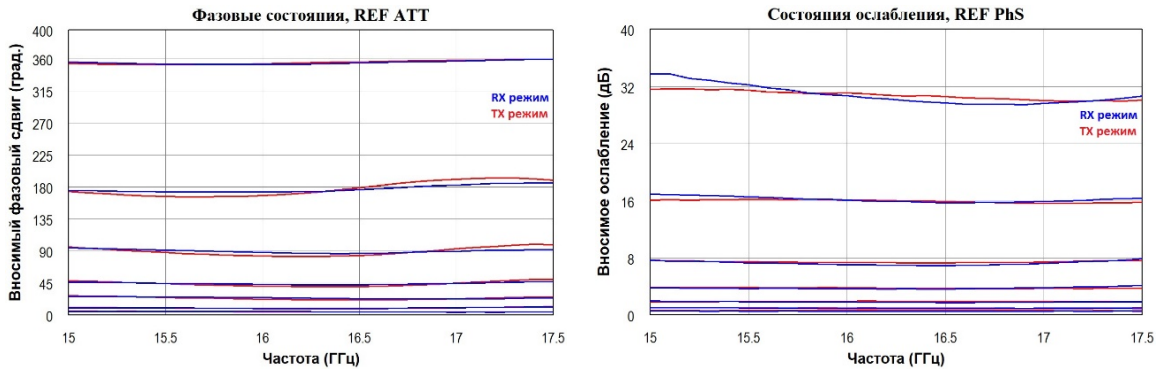


Рисунок 2. Различное поведение характеристик в режимах работы на прием и передачу

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.

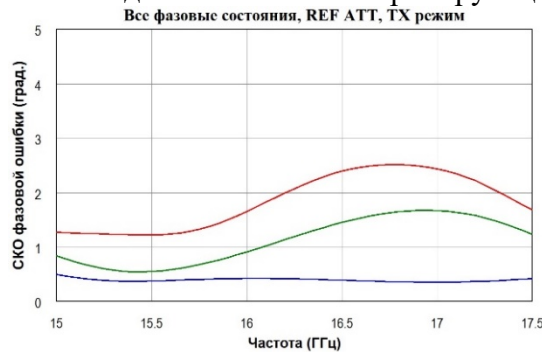


Рисунок 3. Среднеквадратические значения ошибок вносимого фазового сдвига (синяя кривая – моделирование без учета паразитного влияния выходной части тракта; красная кривая – с учетом паразитного влияния выходной части тракта; зеленая кривая – с учетом паразитного влияния выходной части тракта и наличия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

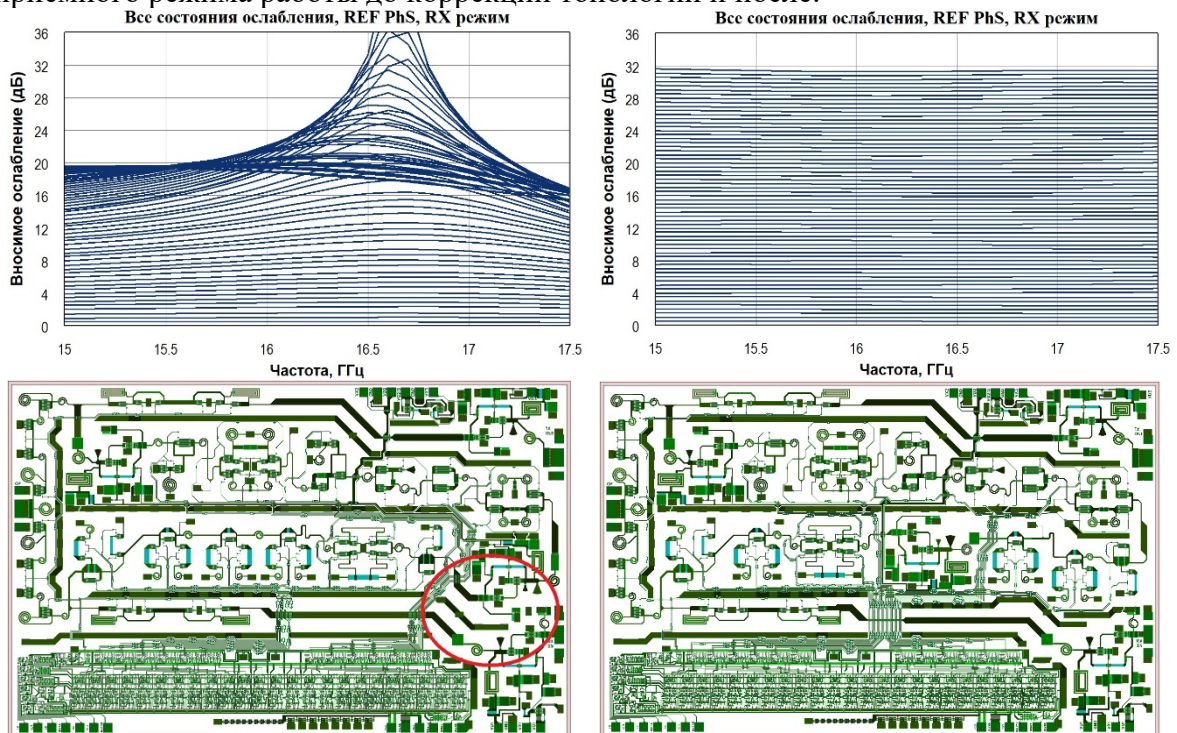


Рисунок 4. Топологии МИС и частотные зависимости управляющих амплитудных характеристик функционального узла аттенюатора для приемного режима работы до коррекции топологии (слева) и после (справа)

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 5,625°), 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 аттенуатора 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.