

# ПОСТРОЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КРЕМНИЕВЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ АФАР В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

ИГОРЬ МУХИН, к.т.н., нач. отделения АО «НИИМА «Прогресс», iimukhin@mri-progress.ru

*В статье рассмотрены основные вопросы миниатюризации и удешевления приемно-передающих модулей активных фазированных антенных решеток. Рассматриваются также вопросы проектирования многофункциональных монолитных интегральных схем с использованием кремниевых технологий, приводится их сравнение с GaAs-схемами.*

В настоящее время современную радиолокационную систему (РЛС) уже невозможно представить без активных фазированных антенных решеток (АФАР). Существенные преимущества при этом реализуются за счет быстрого электронного сканирования луча посредством управляемого изменения фазы и мощности излучаемого сигнала каждым элементом антенной решетки – приемно-передающим модулем (ППМ). Актуальной задачей при этом является разработка РЛС с АФАР в X-диапазоне частот (8–12 ГГц), т. к. в нем достигается наилучший компромисс между атмосферными потерями на распространение электромагнитных волн и возможностью формирования антенной узкой диаграммы направленности.

Как правило, АФАР содержит от нескольких тысяч до десятков тысяч приемно-передающих модулей. Параметры ППМ определяют все основные характеристики АФАР. Одним из сдерживающих факторов широкого применения АФАР является высокая стоимость СВЧ-компонентов, т. к. по оценкам экспертов, стоимость входящих в ППМ монолитных интегральных схем (МИС) составляет 60–80% от стоимости всего модуля [1].

В настоящее время многочисленные ППМ для АФАР, которые уже вошли в состав радиолокационных комплексов различного назначения, значительно расширив их функциональные возможности, выполнены в основном на GaAs МИС.

При этом применение дискретных элементов или МИС с низкой степенью интеграции ухудшает параметры устройства из-за взаимного влияния межсоединений и рассогласований в СВЧ-трактах. Большое количество паяных и сварных соединений резко снижает надежность и процент выхода годных на этапе сборки. Значительно увеличиваются затраты на монтаж и корпусирование.

Таким образом, снизить стоимость модуля можно, во-первых, за счет сокращения в нем числа микросхем, т. е. путем увеличения их функциональности, и, во-вторых, за счет использования более дешевых технологий кристалльного производства.

В первом случае интерес представляют конструкции, объединяющие все функции ППМ в одной многофункциональной МИС (МФМИС) управления. Эта МФМИС должна включать в свой состав маломощный усилитель, фазовращатель, аттенуатор, предварительный усилитель, цифровую схему управления, коммутирующие элементы, пассивные элементы (трансформаторы) и т. д.

В настоящее время многие иностранные производители разработали полный комплект GaAs МИС для ППМ X-диапазона, в который, как правило, входят микросхема маломощного усилителя, многофункциональная управляющая схема-ядро модуля (core chip, МФМИС) и усилители мощности, совместимые с МФМИС.

Например, многофункциональный кристалл GaAs МИС-ядро XZ1002-BD тайваньской компании M/A-COM Tech Asia содержит переключатели режимов приема/передачи, МШУ, шестиразрядный фазовращатель, пятиразрядный аттенуатор, усилители ПЧ и средней мощности. Структурная схема этой МФМИС представлена на рисунке 1.

Во втором случае во всем мире ведутся разработки ППМ на технологических Si- и SiGe-процессах, имеющих значительный выигрыш по стоимости перед процессами с использованием GaAs, особенно при массовом выпуске [2]. Кроме того, использование Si- и SiGe-технологий позволяет значительно

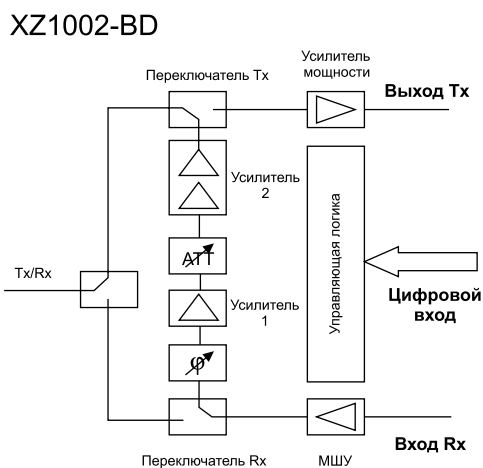


Рис. 1. Структурная схема GaAs МФМИС компании M/A-COM

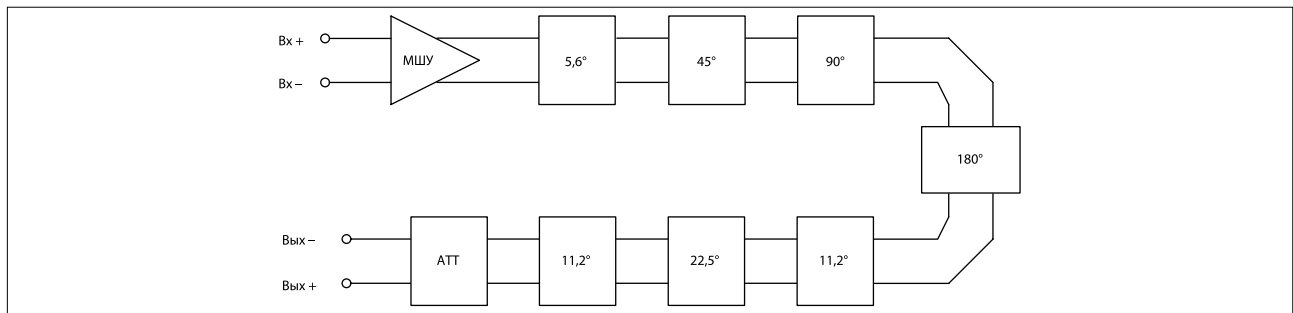


Рис. 2. Структурная схема кристалла МФМИС

увеличить степень интеграции, а, следовательно, функциональность МИС и надежность ППМ. Как уже отмечалось в [3], доля выпуска схем на SiGe с каждым годом растет, сокращая долю GaAs, что подчеркивает перспективность этого направления.

Основные трудности при разработке на Si и SiGe заключаются в том, что данные технологические процессы имеют больше физико-технологических ограничений, чем GaAs:

- больше потери, т.к. выше проводимость подложки;
- значительно меньше динамический диапазон, т.к. ниже уровень пробивных напряжений;
- отсутствию отверстий для заземления, что осложняет работу в СВЧ-диапазоне.

Следует также заметить, что в настоящее время из-за санкций, действующих в отношении России, зарубежные аналоги МФМИС отсутствуют в свободной продаже за исключением низкочастотных медицинских применений. Эти МИС изготавливают крупные компании Raytheon, Northrop Grumman (США) для своих изделий. Поскольку данные изделия в своем большинстве используются для специального применения, возможность их приобретения на внешнем рынке или даже изучения зарубежных образцов крайне затруднительна.

Таким образом, актуальной задачей на сегодняшний день является разработка отечественной МФМИС по кремниевой или кремниво-германиевой технологиям, что в перспективе позволит сократить себестоимость элементной базы ППМ АФАР и увеличить процент выхода годных изделий. Этот подход отражает основные тенденции в мировом развитии построения антенн [4]. В то же время, по мере снижения себестоимости намечается спрос на применение АФАР в бытовой технике – в автомобильной радиолокации, для метео- и других типов локаторов в авиации, в навигации, радиочастотной идентификации и т.д.

АО «НИИМА «Прогресс» уже длительное время занимается разработкой кремниво-германиевых схем для ППМ АФАР и обладает значительным опытом в этом вопросе. В настоящее время ведутся работы по созданию МФМИС X-диапазона на основе SiGe БКМОП технологии с проектными нормами 0,25 мкм.

По результатам данной работы были проанализированы разные способы построения главных элементов приемно-передающего модуля радиолокационного тракта и спроектированы СВЧ МИС фазовращателя и аттенюатора с компенсированным усилением и цифровым управлением, а также МИС МШУ. Было проведено схемотехническое проектирование и моделирование СВЧ МИС, и разработана топология кристалла.

Структурная схема спроектированного кристалла МФМИС представлена на рисунке 2.

Кристалл МФ МИС состоит из дифференциальных МШУ, фазовращателя (ФВ) и аттенюатора (АТТ). Малошумящие усилители СВЧ-диапазона обеспечивают минимальный коэффициент шума при достаточном усилении, чтобы шумы последующих трактов оказывали меньшее влияние. МШУ широко применяются в приемных трактах ППМ.

Для построения МШУ была выбрана двухкаскадная конфигурация, чтобы обеспечить высокий коэффициент усиления. Дифференциальное включение позволяет избавиться от паразитной индуктивности на землю. Первый каскад представляет собой узкополосный усилитель каскодного типа с низким коэффициентом шума. Второй каскад – каскад с параллельной отрицательной обратной связью по току через эмиттерный повторитель и последовательной связью по напряжению за счет резистора в цепи эмиттера входного каскада. У этого каскада – следующие особенности:

- цепь обратной связи через эмиттерный повторитель (ЭП) имеет дополнительный диод для расширения динамического диапазона;
- в цепь обратной связи введены индуктивности около 550 пГн перед эмиттерным повторителем; схема чувствительна к значению этой индуктивности и ее активному сопротивлению. Моделирование показало, что введение индуктивности расширяет полосу пропускания до 12–16 ГГц в зависимости от добротности индуктивности.

Фазовращатель – элемент тракта СВЧ, обеспечивающий требуемый фазовый сдвиг отраженной или проходящей волны сигнала. Большинство устройств сдвига фазы представляют собой симметричные цепи и, следовательно, работают эффективно на сигналах, проходящих в любом направлении. Фазовращатели используются в передающих и принимающих каналах ППМ.

Дискретно коммутируемые фазовращатели обеспечивают набор фиксированных значений фазы сигнала. Существует несколько принципов построения таких фазовращателей:

- отражательный на ответвителе;
- проходной с коммутируемыми отрезками линии;
- проходной с коммутируемыми LC ВЧ- или НЧ-фильтрами;
- векторный способ регулировки фазы за счет квадратурных сигналов.

При разработке фазовращателя был выбран принцип, согласно которому фазосдвигающие цепи строились на про-

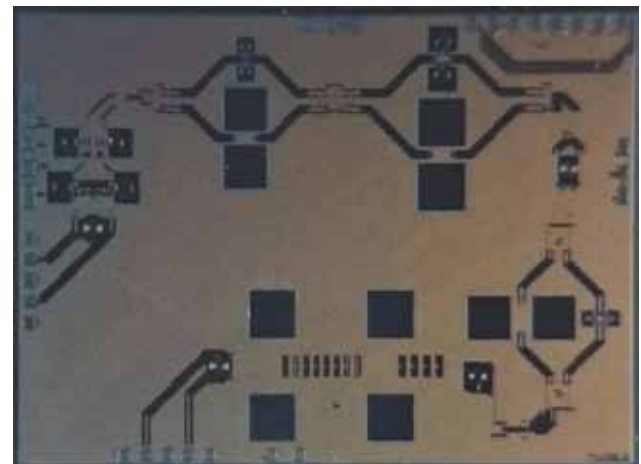


Рис. 3. Фотография кристалла МФМИС

ходных с коммутируемыми LC ВЧ- или НЧ-фильтрами. Коммутация между звеньями осуществляется за счет использования МОП-переключателей.

Для построения аттенюатора для МФМИС выбрана активная схема, в которой между двумя рядами резистивных делителей расположены дифференциальные усилители смена сигнала, управляемые источниками токов. Для требуемого ослабления (усиления) сигнала подключается тот или иной источник тока, питающий требуемый усилитель смена сигнала. Дифференциальная структура уменьшает влияние паразитных элементов в цепи общей шины и снижает амплитуду распространяющихся по подложке сигналов. Фактически эту схему можно рассматривать и как усилитель с переменным коэффициентом усиления.

Переключение фазы и амплитуды выходного сигнала в МФМИС осуществляется за счет встроенной цифровой схемы управления. Управление осуществляется по последовательной трехпроводной шине (14 бит), причем блок управления продублирован – в одном случае используется обычный декодер, а в другом – троированный для защиты схемы управления МФМИС от сбоев, которые могут вызываться внешними факторами. Выбор декодера осуществляется с помощью мультиплексора.

Диапазон рабочей частоты МФМИС составляет 8–11 ГГц. Схема имеет дифференциальные вход и выход, согласованные на 100 Ом. Фотография кристалла размером 4,35×3,21 мм представлена на рисунке 3.

В таблице представлены основные блоки, входящие в состав МФМИС, и их характеристики.

Одной из основных особенностей рассматриваемой схемы является то, что точность установки фазы в данном диапазоне частот (8–11 ГГц) достигается за счет избыточности разрядов фазовращателя.

Разработанная структура МФМИС на текущий момент включает в себя основной набор элементов. В дальнейшем планируется расширить ее функционал. В последующей итерации в состав МФМИС будут включены дополнительные переключатели сигнала и симметрирующие устройства (трансформаторы). Функционально дополненная структурная схема представлена на рисунке 4.

В этой структурной схеме предполагается, что при приеме входной однополярный сигнал от антенного устройства будет подаваться на входной трансформатор (через вход Vx\_O) и далее, уже в дифференциальном виде, с помощью входного переключателя передаваться в схему управления фазой и амплитудой. После регулировки фазы и амплитуды сигнал в дифференциальном виде через выходной переключатель поступает на выходы МФМИС (Вых\_Д-, Вых\_Д+). При передаче сигнала входной дифференциальный сигнал будет напрямую со входов (Vx\_Д+, Vx\_Д-) с помощью входного переключателя поступать в схему управления фазой

Таблица. Параметры блоков МФМИС

Название блока	Основные параметры
Дифференциальный пассивный фазовращатель (ФВ)	6 бит + 3 доп. бита
Дифференциальный активный аттенюатор (АТ)	Потери на проход 7 дБ, ослабление до 30 дБ
Дифференциальный маломощный усилитель (МШУ)	КУ 20 дБ (10 ГГц), КШ 3,5 дБ (10 ГГц)
Дифференциальный переключатель «один в два» с повышенной изоляцией	Потери на проход 2 дБ (10 ГГц), изоляция не менее 35 дБ

и амплитудой. Далее обработанный сигнал с помощью выходного переключателя подается на выходной трансформатор, а затем в однополярном виде поступает на выход МФМИС (Вых\_О). Предложенная схема коммутации входных и выходных сигналов позволит использовать один кристалл МФМИС для приема и передачи, что сократит количество необходимых кристаллов в два раза.

Кроме того, в дополненной структурной схеме встроенный входной усилитель расположен в конце схемы перед аттенюатором. Это связано с тем, что на входе МФМИС предполагается использовать внешний МШУ, выполненный с помощью технологий группы АIIIВV (GaAs, GaN). Это решение улучшит динамические параметры ППМ, а также компенсирует потери сигнала, связанные с введением дополнительных пассивных элементов.

### ВЫВОДЫ

Итак, следующим этапом развития направления АФАР является построение ППМ с использованием кремниевой компонентной базы. При этом наилучшие характеристики трактов будут достигнуты благодаря размещению на входе и выходе устройств (МШУ и усилителя мощности), выполненных с использованием технологий группы АIIIВV (GaAs, GaN), а все управление будет реализовано в кремниевой МФМИС. ◀

### ЛИТЕРАТУРА

1. Викулов И. Монолитные интегральные схемы СВЧ технологическая основа АФАР//Электроника НТБ. Выпуск 7/2012.
2. Cressler J. D. SiGe Technology: New Research Directions and Emerging Application Opportunities//IEEE Electron Devices Society Distinguished Lecture. 2009.
3. Немудров В. Г., Бычков М. С., Ионов Л. П., Малышев И. В., Мухин И. И., Репин В. В., Шабардин Р. С. СВЧ кремниезерманиевые монолитные интегральные схемы: преимущества и достижения//Электроника НТБ. Выпуск 6/2015.
4. Rebeiz G. Recent Developments in SiGe and CMOS Phased Arrays for millimeter-Wave Application//iee.org/r6/phoenix/wad/MeetingSite\_files/doc/Rebeiz\_Phroenix. April. 2012. IEEE.

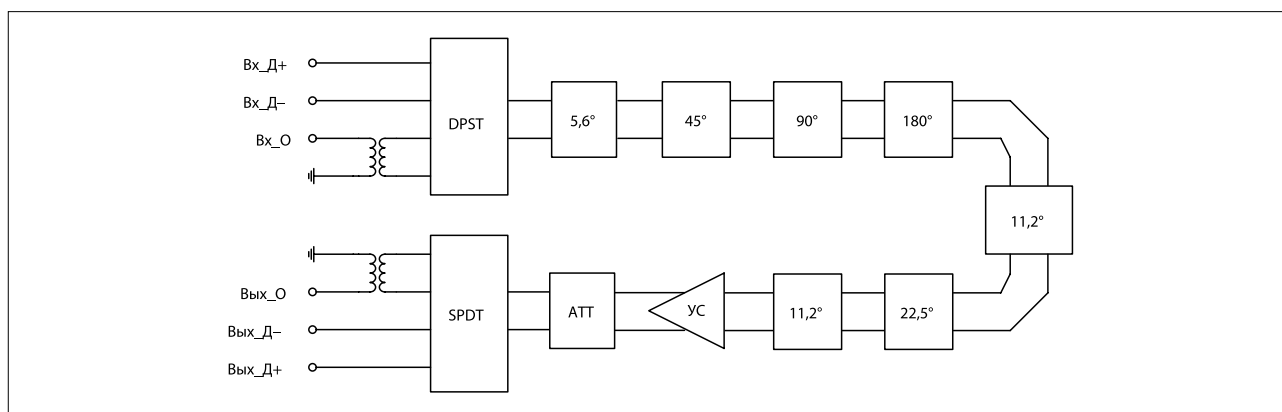


Рис. 4. Дополненная структурная схема МФМИС