

Применение пассивных интегральных схем на арсениде галлия для построения импульсного усилителя мощности в X-диапазоне частот

С.В. Гармаш

АО «Микроволновые системы»

Аннотация: в данной работе рассмотрены возможности использования пассивных интегральных схем на подложках арсенида галлия в схеме усилителя мощности для импульсных передатчиков X-диапазона частот. Обсуждаются особенности конструкций пассивных ИС. Приведена конструкция и электрические характеристики двухкаскадного предварительного усилителя мощности диапазона частот 8,5-9,7 ГГц с выходной мощностью 13-15 Вт, использующего описанную технологию.

Ключевые слова: СВЧ усилитель, X-диапазон, экспериментальные характеристики, импульсный режим.

1. Введение

К современным передающим устройствам предъявляются высокие энергетические требования, необходима высокая мощность и КПД при низких массогабаритных параметрах. Обеспечить удовлетворение этих требований позволяет применение в построении усилительного тракта передатчика GaN транзисторов и GaN монолитных интегральных схем, обладающих высокой удельной выходной мощностью. Разработка и производство монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ диапазона на нитриде галлия - один из самых быстро и успешно развивающихся секторов мировой электроники, однако, стоимость их изготовления остается весьма высокой. Ориентировочно стоимость 1 мм^2 усилительной МИС на GaN подложке в 2-3 раза выше, чем на GaAs подложке и в 5 раз выше GaAs монолитной интегральной схемы, содержащей только пассивные элементы. Как правило, в МИС СВЧ усилителя мощности пассивными элементами цепей питания и согласования занято около 70% площади кристалла. Для решения задачи снижения стоимости GaN усилителей целесообразно размещение пассивной части схемы на более дешевой подложке, отдельно от дискретных кристаллов активных элементов. Целый ряд зарубежных публикаций последних лет представляет примеры комбинированного использования в СВЧ усилителях пассивных схем на GaAs. Например, в работе [1] описан мощный 70-ваттный усилитель диапазона частот 8.4 – 9.8 ГГц, использующий дискретный кристалл GaN транзистора и две платы с согласующими цепями на подложке GaAs. В работе [2] представлен 45-ваттный усилитель в том же диапазоне частот, входная согласующая цепь и активный элемент которого выполнены на одном кристалле по технологии GaN на Si, а выходная согласующая цепь – отдельно, на подложке GaAs.

Ниже рассмотрено применение этого подхода в разработке импульсного усилителя X-диапазона.

2. Особенности конструкции пассивных схем на арсениде галлия

Для изготовления пассивных схем (ПС) в качестве исходного материала могут использоваться как исходные пластины полуизолирующего арсенида галлия, так и эпитаксиальные структуры с удаленным активным слоем. Основные принципы технологии изготовления ПС описана в [3]. Одним из наиболее эффективных и

оправданных применений ПС в широкополосных модулях СВЧ является реализация согласующе-трансформирующих цепей (СТЦ) мощных усилителей, в первую очередь межкаскадных СТЦ в двух-трехкаскадных усилительных интегральных схем. Для построения импульсного усилителя X-диапазона частот по двухкаскадной схеме был выбран вариант конструкции, показанный в разрезе на рисунке 1. Конструкция содержит три GaAs платы с пассивными элементами и два дискретных кристалла транзистора (GaN НЕМТ). Толщина плат и кристаллов транзисторов одинакова и составляет 100 мкм.

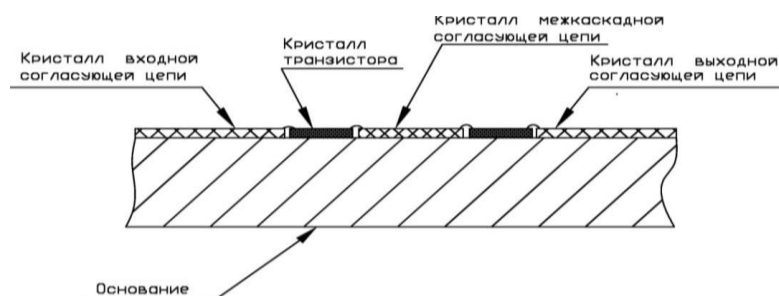


Рисунок 1. Гибридно-монокристаллический усилитель мощности с пассивным кристаллом СТЦ

Основные преимущества использования ПС в конструкциях модулей СВЧ по сравнению с применением традиционных керамических подложек гибридных интегральных схем (ГИС):

- Возможность реализации СТЦ мощных усилителей и других устройств на базе схем с сосредоточенными параметрами, что существенно увеличивает широкополосность устройств и уменьшает их размеры.

- Возможность применить ПС с толщиной, равной толщине кристалла транзистора или МИС, что снижает индуктивность присоединения кристалла до минимума и упрощает конструкцию кристаллодержателя ГИС.

- Возможность одновременной реализации на подложке сосредоточенных МДМ конденсаторов и сквозных металлизированных отверстий.

- Возможность реализации в 2-5 раз меньших волновых сопротивлений линий передачи, чем на керамических подложках.

- Возможность реализации интегральных перемычек типа «воздушный мост», в частности – в конструкциях ответвителей Ланге.

Типовые проектные нормы, используемые при разработке ПС, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Ед. изм.	«Микран» (г.Томск)	НИИПП (г.Томск)	WIN IP3M (Тайвань)	HiWafer IPD010 (Китай)
Сопротивление резистивной пленки	Ом / □	20/50	20/50	50	50
Удельная емкость конденсаторов	пФ/мм ²	135/400	750	195/400	88/142/300
Толщина металлизации	мкм	4	0.3+2.5+7.0	1.0+2.0+4.0	1.0+4.0 макс
Минимальный размер элемента	мкм	3.0, 5.0		2.0, 4.0	2
Точность геометрических размеров элементов с гальваническим покрытием	мкм	0.25	0.25	0.25	0.25
Толщина кристалла	мкм	100*	100	100	75, 100

Пробивное напряжение конденсаторов	V	70	70	80...320	150-300
Плотность тока в проводниках	мА/мкм	12 макс		28 макс	20 макс

3. Импульсный усилитель X-диапазона

Применение ПС в качестве СТЦ позволило разработать малогабаритный двухкаскадный усилительный элемент, перекрывающие диапазоны частот от 8.5 ГГц до 9.7 ГГц. Расчетная структурная схема усилителя показана на рисунке 2. Напряжение питания -5В / +28 В

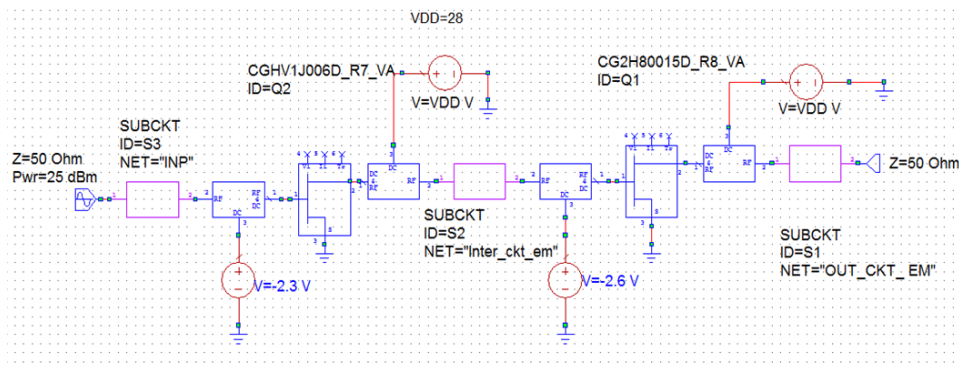


Рисунок 2. Расчетная схема усилителя

Усилитель реализован по двухкаскадной схеме. Для построения усилителя были выбран GaN транзистор с шириной затвора 3.5 мм (паспортная выходная мощность 15Вт при напряжении питания 28 В) для выходного каскада и GaN транзистор с шириной затвора 1.2 мм (паспортная выходная мощность 6 Вт на частоте 10 GHz при напряжении питания 40 В) для первого каскада.

Выходная согласующая цепь спроектирована исходя из условия получения максимальной выходной мощности в режиме насыщения в рабочем диапазоне частот. Из нелинейных моделей транзисторов, предоставленных производителем, были определены паразитные параметры транзисторов и проведен Load-Pull анализ для определения требований к импедансу выходной согласующей цепи. Нагрузочные контура импедансов для условий максимума выходной мощности и максимума КПД в сравнении с импедансом реализованной цепи приведены на рисунке 3а. На рисунке 3б также приведена эквивалентная схема оптимальной согласующей цепи.

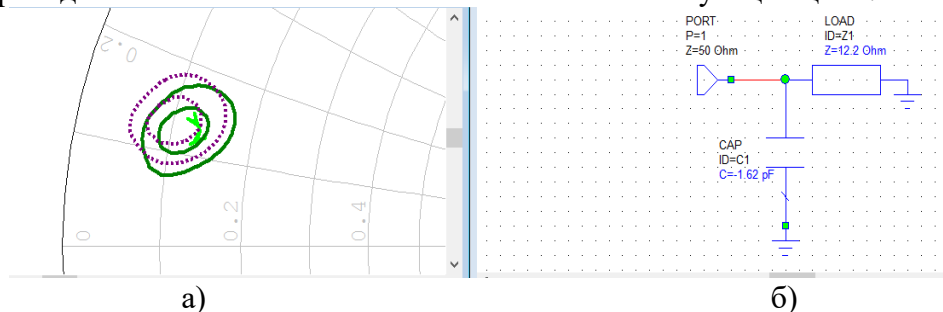


Рисунок 3. а) Контура импедансов нагрузки $R_{\text{вых}}=42$ дБм и 41.5 дБм (сплошная линия) и PAE 55 и 50 % (пунктир) в сравнении с импедансом реализованной цепи. б) Эквивалентная схема оптимальной выходной СТЦ транзистора выходного каскада.

Для транзистора первого каскада был проведен аналогичный анализ. Оптимальный импеданс нагрузки для него также может быть представлен в виде

эквивалентной схемы, аналогичной представленным на рисунке 3, с параметрами $C=0.55$ пФ, $R=60$ Ом.

Входная цепь выполняет функцию согласующе-корректирующей. Синтез и оптимизация входной цепи проведены исходя из условий согласования с 50-омной линией передачи со стороны входа и достижения максимального коэффициента усиления при минимальной частотной неравномерности усилителя в рабочей полосе частот.

Задача межкаскадной согласующей цепи обеспечить близкий к оптимальному нагружающий импеданс транзистора первого каскада, и согласование по входу транзистора второго каскада, необходимое для получения его максимального усиления. Кроме того, эта цепь вносит существенный вклад в формирование АЧХ усилителя. В процессе проектирования был достигнут компромисс между этими условиями.

Оптимизация топологии трех плат согласующих цепей была проведена с помощью программы электродинамического моделирования AWR. Платы содержат как распределенные элементы согласования, так и сосредоточенные МДМ конденсаторы, а также резистивные стабилизирующие цепи и делители напряжения смещения затворов транзисторов. Платы спроектированы и изготовлены по технологии IPD010 (см. табл.1, (удельная емкость 88пФ/мм²). Для возможности размещения плат на одной пластине они имеют одинаковый размер 3.2 x 4 мм, выполнены на GaAs подложке толщиной 100мкм. Усилитель размещен в корпусе для поверхностного монтажа размером 16.5 x 8.2 мм.

Конструкция усилителя показана на рисунке 4

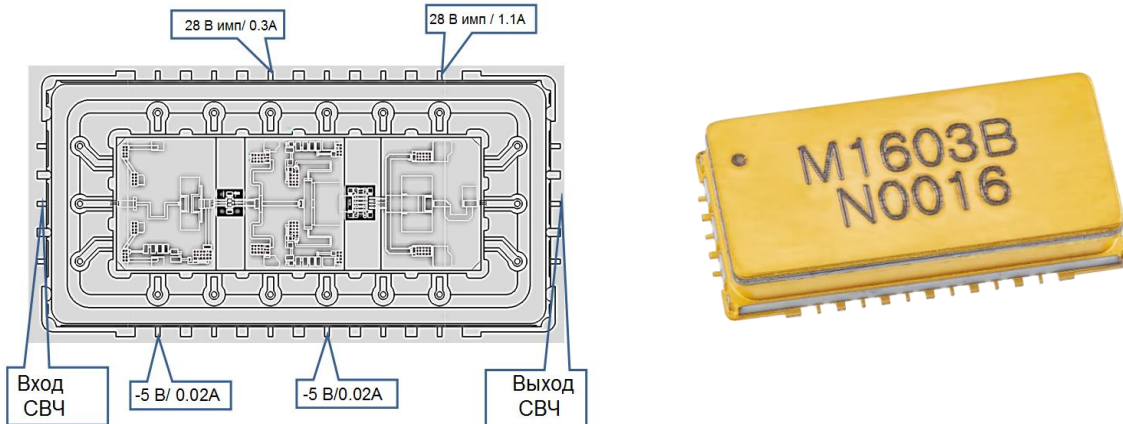


Рисунок 4. Гибридно-монокристалльный усилитель мощности с пассивным кристаллом СТЦ

Экспериментальные электрические характеристики усилителя приведены на рисунке 5. Результаты измерений приведены в плоскости СВЧ коаксиальных соединителей контактного устройства, в котором проводились измерения. Потери контактного устройства составляют около 0.4 дБ. Получен КПД 33-38%, Выходная мощность в импульсном режиме составила 13-15 Вт (длительность импульса 100мкс, скважность 10).

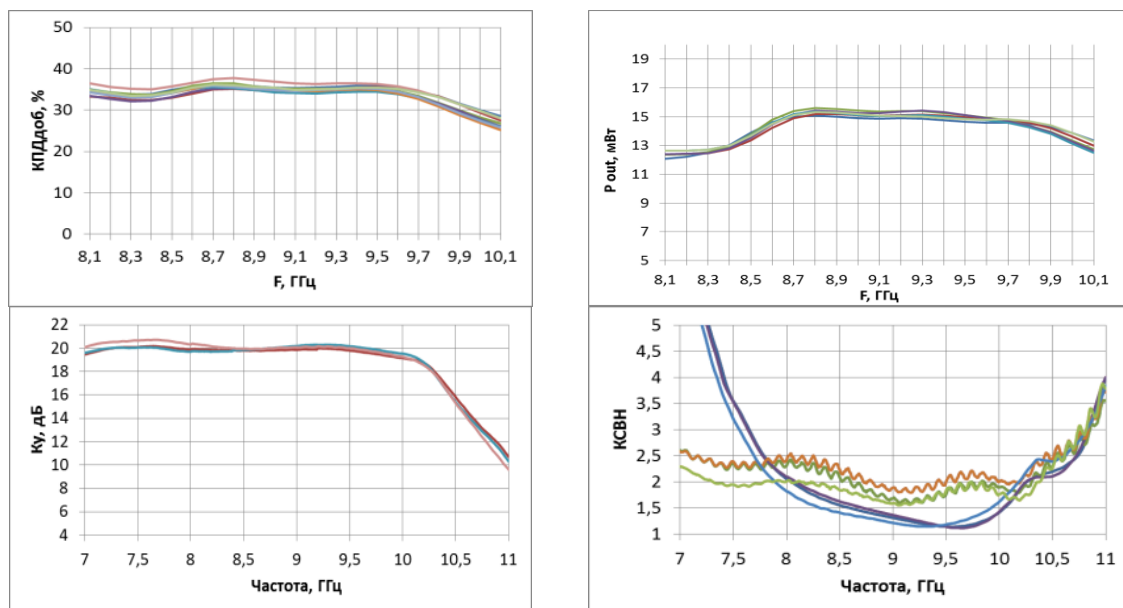


Рисунок 5. Экспериментальные характеристики усилителя

4. Заключение

Использование пассивных кристаллов на арсениде галлия в конструкциях широкополосных модулей СВЧ позволяет снизить стоимость усилительного тракта по сравнению с применением GaN монокристаллических интегральных схем, а также существенно расширяет возможности миниатюризации устройств по сравнению с традиционной технологией ГИС с использованием керамических подложек. Представлены практические результаты разработки двухкаскадного импульсного усилителя X-диапазона частот с выходной импульсной мощностью 13-15 Вт, который может использоваться в тракте предварительного усиления сигнала передающих устройств.

Список литературы

1. D. Resca. A miniature 70 W quasi-MMIC PA block suitable for highly integrated X-band pulsed SSPA schemes / D. Resca, F. Scappaviva // Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2016. - P. 225-228.
2. J. Kamioka. A Low-Cost 30-W Class X-Band GaN-on-Si MMIC Power Amplifier with a GaAs MMIC Output Matching Circuit // Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2016. - P. 93-96.
3. С.В.Гармаш. Применение технологии пассивных схем на арсениде галлия в изготовлении широкополосных усилителей мощности СВЧ / С.В.Гармаш, А.А.Кишинский, В.Г.Лапин, М.С.Рогожникова // Материалы 9 Крымской микроволновой конференции. – Севастополь, Вебер, 1999. - С. 5-8.