

Применение технологии пассивных схем на арсениде галлия в изготовлении широкополосных усилителей мощности СВЧ.

С.В.Гармаш*, А.А.Кищинский*, В.Г.Лапин**, М.С.Рогожникова**.

*ГосЦНИРТИ, 107066, г.Москва, ул.Новая Басманная,20, т. 263-97-24, E-mail: power@cityline.ru

**ГНПП "Исток", 141120, г.Фрязино, Московской обл., ул. Вокзальная, 2а, т. 465-86-93

Аннотация. В докладе рассмотрены возможности, преимущества и недостатки использования пассивных согласующих цепей на подложках арсенида галлия в схемах широкополосных усилителей мощности СВЧ. Описана технология изготовления и особенности конструкции пассивных согласующих кристаллов. Приведены конструкции, особенности расчета и электрические характеристики миниатюрных двухкаскадных усилителей мощности в диапазонах частот 4-8 ГГц и 4-11 ГГц с выходной мощностью 0.65-1.6 Вт, использующих описанную технологию.

I. Введение.

Основными направлениями совершенствования характеристик широкополосных усилителей мощности (УМ) СВЧ диапазона является повышение удельных параметров транзисторных структур на основе новых полупроводниковых технологий (HFET, PHEMT, HBT) с одной стороны, и увеличение степени интеграции усилительных интегральных схем, с другой. Ведущими фирмами мировой электронной индустрии достигнуты в этом направлении впечатляющие результаты. В диапазоне 2.8-6 ГГц на кристалле площадью 60 мм² реализован двухкаскадный монолитный усилитель с выходной мощностью 12-16 Вт [1], в диапазоне 6-18 ГГц продемонстрирован кристалл трехкаскадного усилителя площадью 40.7 мм² с выходной мощностью 3-5.6 Вт [2], имеется сообщение о достижении в этом диапазоне выходной мощности 8 Вт [3].

Успехи российской электроники в этом направлении значительно скромнее. Это обусловлено необходимостью крупномасштабных капиталовложений в развитие субмикронных полупроводниковых технологий, каковые последние 5-7 лет отсутствовали и не просматриваются в ближайшей перспективе. В то же время имеется интересная возможность использования существующих и хорошо освоенных технологий для повышения степени интеграции и характеристик УМ СВЧ - объединение кристаллов дискретных транзисторов с требуемыми удельными параметрами (российского или зарубежного производства) и согласующе-трансформирующих цепей (СТЦ) с сосредоточенными и распределенными элементами на подложках из полуизолирующего арсенида галлия. Ниже рассмотрено применение этого подхода в некоторых практических разработках.

II. Достоинства и недостатки технологии.

При принятии решения об использовании той или иной технологии изготовления активных элементов мощных СВЧ усилителей следует иметь в виду, что при изготовлении монолитных

схем средний процент выхода годных на технологических участках российских предприятий составляет 5 - 20% с пластины, а с учетом бракованных пластин в группе может быть еще ниже. Кроме того, площадь активного элемента на монолитной схеме составляет 10 - 25%, при этом следует учитывать особенности распределения годных транзисторов по пластине (хорошие транзисторы группируются обычно в одной области пластины). Выше сказанное свидетельствует о нерациональном использовании эпитаксиальной структуры при котором 75 - 90% площади пластины, на которой могли быть изготовлены транзисторы, используется для размещения пассивных цепей монолитных схем. Пассивные цепи, для которых не требуется дорогостоящая эпитаксиальная структура, можно изготавливать с использованием подложки из полуизолятора. Целесообразным представляется путь использования традиционной гибридной технологии с изготовлением согласующих цепей на полуизоляторе GaAs, такой же толщины как и ПТШ. Этот подход опробован в конструкциях ряда усилительных ячеек в диапазоне частот от 4 до 11 ГГц и показал высокую эффективность.

На рис.1 показаны в разрезе конструкции усилителей мощности, выполненных по различной технологии.

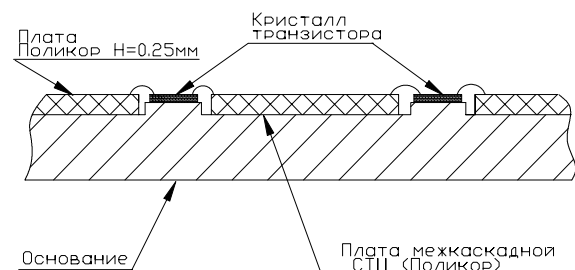


Рис.1а. Гибридно-интегральный усилитель мощности.

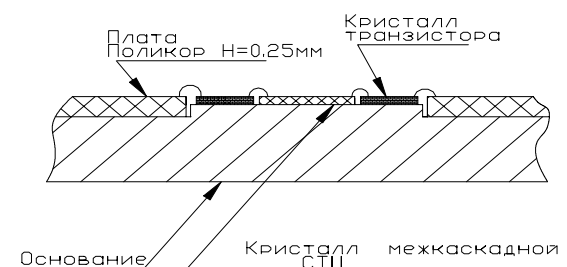


Рис.1б. Гибридно-монолитный усилитель мощности с пассивным кристаллом СТЦ.



Рис.1в. Гибридно-монолитный усилитель мощности с пассивным кристаллом и однополярным питанием (с автосмещением).

Преимущества рассматриваемой технологии по сравнению с чисто монолитной технологией:

1. Возможность осуществить предварительный отбор пассивной схемы и активного компонента.
2. Возможность использования для изготовления пассивных схем технологических процессов, неприемлемых при изготовлении транзисторов.
3. Рациональное использование подложки GaAs за счет изготовления пассивных и активных цепей на разных пластинах и повышение процента выхода годных конечных приборов.
4. Возможность замены активного прибора в случае выхода его из строя (монолитный кристалл нужно менять целиком).
5. Возможность выбора толщины пассивного кристалла независимо от толщины кристалла транзистора.

Преимущества по сравнению с гибридной технологией:

1. Малые размеры (двухкаскадная ячейка длиннее однокаскадной всего на 1.6...1.7 мм)
2. Расположение поверхности кристаллов транзисторов и согласующей цепи на одном уровне и возможность установки кристаллов с минимальным зазором обеспечивает удобство монтажа и минимизацию индуктивности проволочных перемычек.
3. Возможность одновременной реализации на подложке сосредоточенных МДМ конденсаторов и сквозных металлизированных отверстий.
4. Возможность реализации в 2-5 раз меньших волновых сопротивлений линий передачи.

Недостатки по сравнению с монолитной технологией:

1. Увеличение трудоемкости монтажа.
2. Некоторое (весьма малое) увеличение размеров.
3. Возрастание паразитных параметров из-за появления дополнительных соединений и неточности при посадке кристаллов.

Недостатки по сравнению с гибридной технологией:

1. Ограничены возможности оперативной настройки согласующей цепи на арсениде галлия.
2. Некоторое ухудшение теплового режима в связи с увеличением количества активных элементов на единицу площади.

III. Технология изготовления монолитных пассивных схем на подложке из арсенида галлия.

В качестве исходного материала для изготовления монолитных пассивных схем используются пластины полуизолирующего арсенида галлия диаметром 50 или 60 мм.

Для формирования нижних обкладок конденсаторов и резисторов с помощью электронно-лучевого испарения на поверхность пластин напыляется тройной слой металлов Ti-Al-Ti, с поверхностным сопротивлением нижнего слоя титана 20 Ом/. Далее с помощью фотолитографии и жидкостного травления (последовательно Ti, Al, Ti) формируются нижние обкладки конденсаторов, нижний уровень металлизации, для формирования резисторов проводится следующая фотолитография и травление верхних слоев Ti и Al до нижнего слоя Ti, который и является материалом резисторов.

Для формирования диэлектрического слоя конденсаторов и защитного слоя резисторов методом реактивного распыления наносится слой Ta₂O₅ до толщины, необходимой для получения заданной удельной емкости конденсаторов. Заданный рисунок диэлектрического слоя формируется методом фотолитографии. Верхние обкладки конденсаторов, "воздушные" мостики, межсоединения и контактные площадки формируются с использованием стандартных процессов напыления подслоя Ti-Au, фотолитографии, локального гальванического осаждения золота и ионного и жидкостного травления металлов. Далее пластины шлифуются и полируются до нужной толщины.

Для формирования металлизированных отверстий используются процессы фотолитографии с двусторонним совмещением, локальное травление арсенида галлия, химическое осаждение никеля и гальваническое осаждение золота на обратной стороне пластины.

IV. Конструкции и характеристики усилителей.

Описанная выше технология была использована при разработке гибридно-монолитных двухкаскадных усилительных ячеек в диапазонах частот 4-8 ГГц и 4-11 ГГц на полевых транзисторах "Пират-22" (кристалл размером 0.6 мм x 1.2 мм x 0.1 мм, ширина затвора 2200 мкм), сходных по конструкции. Транзисторы включены по схеме с общим истоком. Схемы усилительных ячеек содержат двухконтурную входную согласующую цепь на распределенных элементах, выходную согласующую цепь на распределенных элементах, цепи питания и смещения затвора и межкаскадную СТЦ. Питание ячеек двухполярное +6...7 В / -4...5 В. Параметры ячеек приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Диапазон частот, ГГц	4-8 ГГц	4-11 ГГц	4-8 ГГц*
Коэффициент усиления, дБ	15	11	16.1*
Минимальная мощность насыщения, Вт	0.76	0.6	1.6*
Потребляемый ток, мА	500	500	750*
Габаритные размеры, мм	7.6x5	12x4.1	16x5*
Размеры пассивного кристалла, мм	0.9x1.8	1x1.6	1.3x2.4*

Входная и выходная согласующие цепи реализованы на микрополосковых платах (поликор толщиной 0.25 мм), приклеенных на металлическое основание. Межкаскадные СТЦ реализованы на пластине полуизолирующего арсенида галлия (кристалл толщиной 0.1 мм). Они содер-

жат распределенные элементы согласования, монокристаллические конденсаторы, цепь питания стока транзистора первого каскада и цепи смещения затвора транзистора второго каскада. Емкости на подложке GaAs имеют структуру металл-диэлектрик-металл. Нижние обкладки конденсаторов при необходимости заземляются через металлизированные отверстия. Кристаллы транзисторов имеют металлизированные отверстия истока и устанавливаются непосредственно на выступ основания, что позволяет свести к минимуму индуктивность истокового вывода транзистора. На выступе основания также размещаются: блокирующий конденсатор питания стока транзисторов и пассивный кристалл. Общий вид ячейки диапазона 4-8 ГГц показан на рис.2а. Конструкция ячейки диапазона 4-11 ГГц аналогична ей.

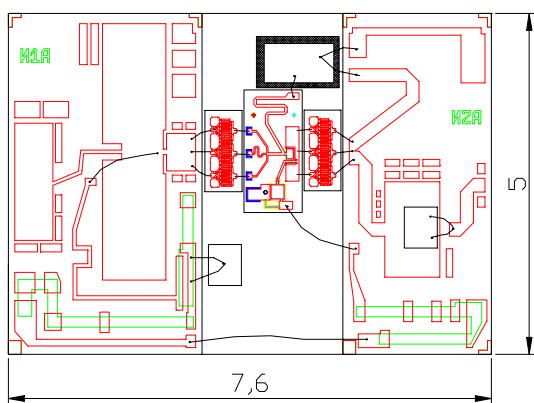


Рис.2а.

На рис.2б показана часть ячейки на трех транзисторах диапазона 4-8 ГГц (кристаллы транзисторов, пассивный кристалл СТЦ и навесные конденсаторы цепей питания стока и смещения затвора). Второй каскад усилительной ячейки содержит два транзистора, включенных по схеме с общим истоком. Пассивная межкаскадная СТЦ на арсениде галлия совмещена с делителем СВЧ мощности на 2 канала. Последовательный сосредоточенный конденсатор цепи согласования одновременно играет роль разделительного. В цепях затворов каждого транзистора выходного каскада имеется параллельная цепь, содержащая резистор коррекции АЧХ в нижней части рабочего диапазона и шлейф, замкнутый на конце с помощью конденсатора, нижняя обкладка которого заземлена через отверстие. Напряжение смещения затвора подается через верхнюю обкладку одного из этих конденсаторов. Для соединения верхних обкладок конденсаторов с другими элементами СТЦ используются "воздушные мостики". Кроме этого на кристалле размещен параллельный резистор (250 Ом) делителя напряжения смещения затвора (остальные резисторы делителя находятся на поликоровой плате выходной цепи).

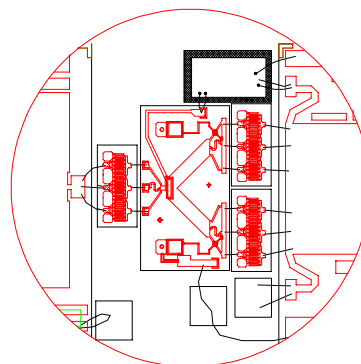


Рис.2б.

Расчет и оптимизация схемы и топологии усилительных ячеек проведены с помощью ППП "Microwave Harmonica". В расчете использовались модели микрополосковых элементов и нелинейная модель транзистора "Пират-22", полученная из результатов измерений его параметров. Отдельные элементы межкаскадной СТЦ при невозможности корректного описания их моделями пакета "Microwave Harmonica" и необходимости учета плотной компоновки уточнялись путем электромагнитного расчета с помощью демонстрационной версии программы "Microwave Office 2.5".

Расчетная малосигнальная АЧХ ячейки диапазона 4-8 ГГц приведена на рис.3. Результаты экспериментальных исследований (малосигнальный коэффициент усиления и выходная мощность в режиме насыщения в полосе 4-8 ГГц) семи макетов ячеек приведены в таблице 2.

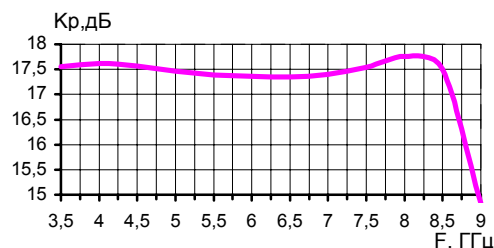


Рис.3.

Таблица 2

N макета	2	3	4	5	6	7
Крмин, дБ	15,5	15,0	14,6	14,0	13,9	15,0
Крмакс, дБ	18,5	18,0	18,0	17,3	16,9	18,6
Рмин, мВт	850	780	820	800	760	810
Рмакс, мВт	1000	980	950	1050	880	980

Измеренная выходная мощность в режиме насыщения составила 760 - 1050 мВт (расчетная мощность насыщения - 870 - 970 мВт). Видно, что результаты расчета и эксперимента очень хорошо соответствуют друг другу, что свидетельствует о высоком качестве математической модели транзистора и корректном описании схемы ячейки.

Расчетные и экспериментальные характеристики макетов усилительной ячейки диапазона 4-11 ГГц приведены на рисунках 4а и 4б.

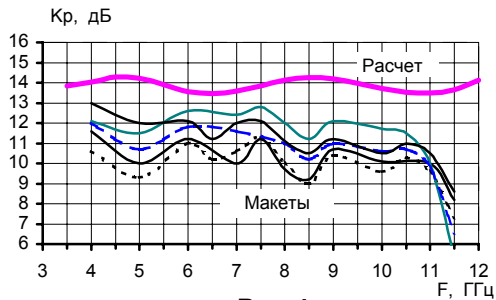


Рис.4а.

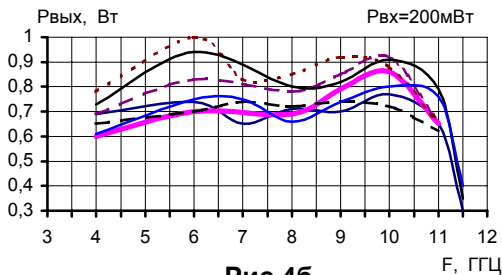


Рис.4б.

Выходная мощность насыщения ячеек составила 600-1000 мВт (по результатам расчета 800 - 950 мВт). Здесь также наблюдается достаточно хорошее соответствие расчета и эксперимента за исключением области 11-12 ГГц.

Повышенная по отношению к расчету частотная неравномерность АЧХ ячеек (до 3 дБ) обусловлена главным образом интерференцией отраженной от входа волны (коэффициент отражения входа ячейки превышает 0.7) и собственных отражений измерительного тракта. Разброс средних значений коэффициента усиления ячеек без отбраковки и группировки составляет не более 1.5 дБ при высоком усилении (15 и 11 дБ, соответственно).

Трехтранзисторная ячейка диапазона 4-8 ГГц не макетировалась (находится в стадии изготовления), в таблице 1 указаны ее расчетные параметры.

Был также изготовлен и исследован вариант ячейки диапазона 4-8 ГГц с однополярным питанием. Его конструкция отличается наличием кремниевого конденсатора с тремя верхними обкладками емкостью 150-300 пФ, на который устанавливаются кристаллы транзисторов и пассивный кристалл межкаскадной СТЦ (см. рис1в.), а также наличием дополнительной платы с резисторами цепи автосмещения. Такая ячейка имеет характеристики, практически не отличающиеся от характеристик прототипа, но требует более тщательной настройки на верхней частоте рабочего диапазона, т.к. ее конструкция приводит к некоторому увеличению паразитных параметров (потери в конденсаторе и более длинные переемы между кристаллами).

Целесообразно использовать пассивные кристаллы также для реализации низкоомных отрезков линий передачи. Такой кристалл (с низкоомным емкостным шлейфом) был использован в конструкции усилительной ячейки с выходной мощностью 1.5 Вт в диапазоне частот 7.9-8.4 ГГц

на транзисторе типа LF3850 фирмы "Filtronic (Litton) Solid State" (рис5).

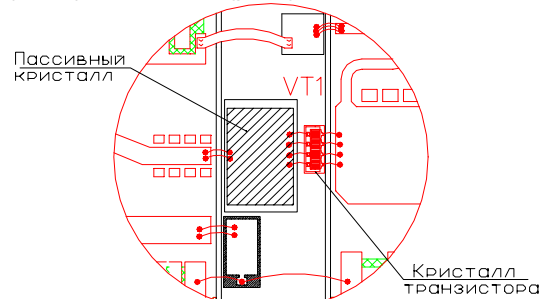


Рис.5.

V. Заключение.

Использование технологии пассивных кристаллов на арсениде галлия дает в руки разработчика СВЧ устройств эффективный инструмент для создания миниатюрных широкополосных СВЧ устройств с использованием сосредоточенных и распределенных элементов, с высокоточным формированием металлизированных отверстий и оптимальным выбором толщины подложки. Эффективность описанной технологии подтверждена практическими разработками широкополосных двухкаскадных усилителей в диапазонах 4-8 ГГц и 4-11 ГГц.

VI. Список литературы.

- [1] M. R. DeHaan et al. A 15-Watt Dual Band HBT MMIC Power Amplifier // 1997 MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol.3, p.1425-1427.
- [2] A.R.Barnes, M.T.Moore, M.B.Allenson. A 6-18GHz Broadband High Power MMIC for EW Applications // 1997 MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol.3, p.1429-1432.
- [3] H. Gershanoff. New GaAs MMIC Chips Show Promise for EW Systems // Journal of Electronic Defense, August'98, p.31.

Using a passive GaAs matching networks in the fabrication of broadband microwave power amplifiers.

S.V.Garmash*, A.A.Kistchinsky*, V.G.Lapin**, M.S.Rogozhnikova**.

*SCRRTI, 20, Novaja Basmannaya St., 107066 Moscow, RUSSIA, tel. (095)263-97-24, E-mail: power@cityline.ru

**SRPC "Istok", Vokzalnaya,2a, 141120 Fryazino Russia, tel: (095)465-86-93

Abstract. A possibilities, advantages and disadvantages of the usage of GaAs passive matching networks in the constructions of broadband microwave power amplifiers are discussed. The technology of fabrication and design features of passive matching chips are described. The topologies of passive matching chips and electrical characteristics of broadband two-stage power amplifiers in the 4-8 GHz and 4-11 GHz bands with an output power 0.65-1.6W are presented.