

Сверхширокополосный усилитель мощности МС4000-2

С.В. Миннебаев, А.В. Кондратенко, Д.А. Шишкин

АО «Микроволновые системы», г. Москва

Аннотация: в данной работе представлены результаты разработки и измерений параметров сверхширокополосного усилителя (СШПУ) среднего уровня мощности ($P_{\text{вых}} = 50$ мВт) с коэффициентом усиления 9 дБ и униполярным питанием. Предпосылкой к проведению данной работы являлось замещение снятой с производства МИС СММ4000-BD, в связи с чем на габаритные и присоединительные размеры усилителей серии МС4000 накладывались строгие ограничения. В результате были изготовлены и измерены СШПУ 2 типов: МС4000 - подходящий для полноценной pin-to-pin замены импортного аналога, а также МС4000-2 - по габаритам и расположению контактных площадок полностью аналогичный первому типу, но обладающий более широким рабочим диапазоном частот и увеличенным коэффициентом усиления.

Ключевые слова: СШПУ, GaAs pHEMT, Монолитная интегральная схема (МИС), Фаблесс-Фаундри.

1. Введение

Одним из основных продуктов, выпускаемых АО «Микроволновые системы», вот уже более 20 лет являются широкополосные СВЧ-усилителей мощности, и их номенклатура постоянно расширяется. На сегодняшний день продукция предприятия перекрывает все востребованные диапазоны с октавными и сверхоктавными полосами частот от 0,5...1 до 18...20 ГГц [1]. Электронная компонентная база (ЭКБ), применявшаяся в составе СВЧ трактов устройств, в основном производилась компаниями, штаб-квартиры которых расположены в США и странах западной Европы. За это время изменившиеся технологические переделы привели к снятию с производства применявшейся в изделиях ЭКБ – возникла необходимость разработать собственную ЭКБ, соответствующую или превосходящую по всем характеристикам выпускавшуюся ранее [2]. Монолитная интегральная схема МС4000-2 является сверхширокополосным усилителем мощности с рабочей полосой частот от 2 до 20 ГГц, уровнем выходной мощности при компрессии 1 дБ не менее 21 дБмВт и коэффициентом усиления не менее 9 дБ. Разработка обусловлена тем, что МИС СММ4000-BD компании Mimix Broadband была снята с производства, а также организацией возможности стабильных поставок ЭКБ для изделий собственного производства.

2. Ход разработки и экспериментальные результаты

Монолитная интегральная схема СММ4000-BD (см. рис.1) представляет из себя УРУ с рабочей полосой частот 2,0-18,0 ГГц, малосигнальный коэффициент усиления составляет не менее 9,0 дБ во всем диапазоне частот. В данной МИС организована однополярная схема питания с тремя подстроечными резисторами в цепи автосмещения для оптимизации параметров изделия в зависимости от уровня выходной мощности. Этот усилитель изготавливался по технологии GaAs pHEMT компании Mimix Broadband с топологической нормой 0,35 мкм, в основе которой была операция оптической литографии (i-line stepper) для обеспечения высокой повторяемости и однородности. Микросхема имеет SiON-пассивацию поверхности для защиты от ВВФ и увеличения ее сроков хранения и эксплуатации [3].

Первая версия усилителя МС4000 (old) (см.рис.2) разработана и изготовлена в

2020 г., по аналогии с прототипом он был построен на основе 3 транзисторных структур с шириной затворных секций $W_g = 6 \times 50$ мкм. В отличие от CMM4000-BD МИС усилителя был разработан на основе технологии GaAs pHEMT с топологической нормой 0,25 мкм, которая позволяет с одной стороны обеспечить возможность расширения рабочей полосы усилителя, а с другой обладает достаточным запасом по такому параметру, как пробивное напряжение затвор-сток, что являлось крайне желательным для организации питания по цепи стока напряжением +8 В.

С точки зрения СВЧ параметров первая итерация разработки MC4000 (old) удовлетворяла параметрам, заложенным при моделировании. К одному из недостатков изготовленной партии опытных образцов следовало отнести паразитный резонанс, наблюдаемый в нормальных климатических условиях на АЧХ усилителя, в области 6 ГГц (см. рис.3), который, однако не приводит к несоблюдению заданных технических требований к разработке. Основным техническим недостатком полученных изделий являлось то, что во время работы при повышенных температурах окружающей среды ($T_{\text{окр.ср}} = 75 \dots 85$ °С) и одновременном уровне компрессии более 1 дБ на достаточно большом количестве образцов (~35%) происходило выгорание «воздушного» моста, входящего в состав индуктивности цепи питания усилителя.

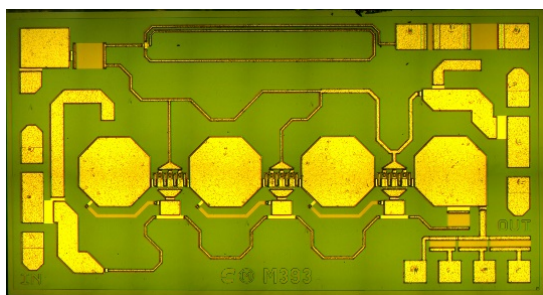


Рисунок 1. Фото CMM4000-BD

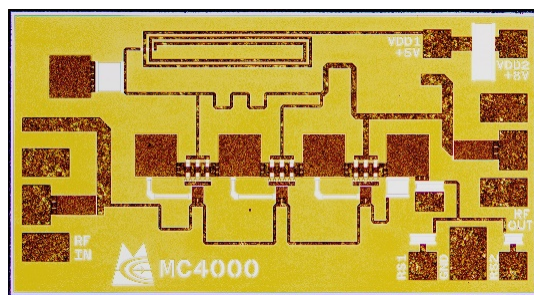


Рисунок 2. Фото MC4000 (old)

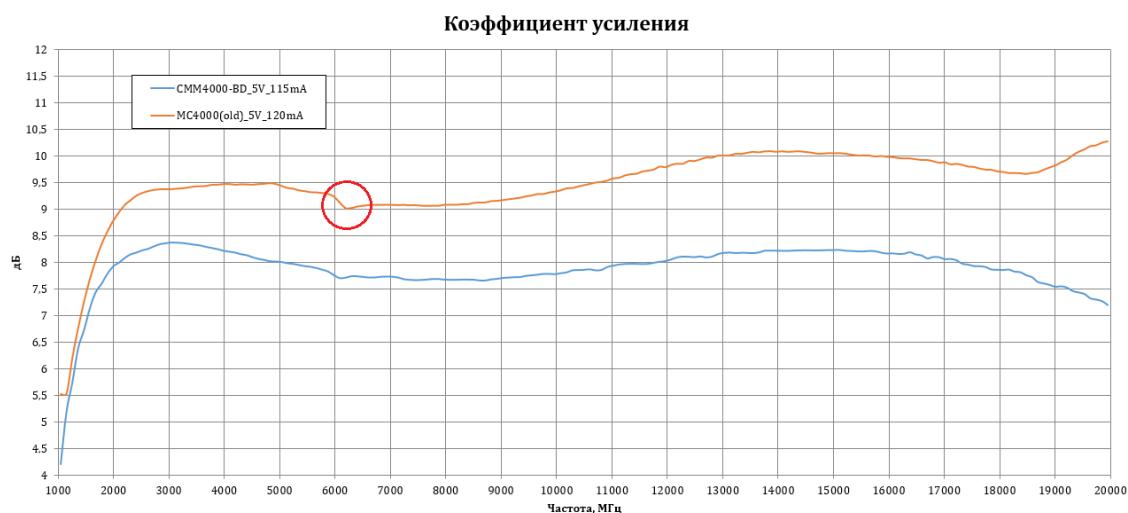


Рисунок 3. Коэффициент усиления (красным-отмечена неоднородность).

С целью устранения выявленных недостатков, а также в связи с переходом на более современный технологический процесс, который, при тех же удельных низкочастотных параметрах, должен был позволить повысить значение коэффициента усиления в верхней части рабочего диапазона частот, в 2022-2023 гг. была проведена доработка проекта MC4000 (old). В обновленном дизайне MC4000 (new) (см. рис.5) с целью предотвращения выгорания «воздушного моста» в цепи питания стока его ширина была увеличена в 2 раза, в остальном топология МИС не претерпела

значительных изменений.

При разработке МИС MC4000-2 (см. рис. 6) была поставлена задача расширения диапазона рабочих частот по нижней границе до 1,5 ГГц, а также устранение неоднородности АЧХ, наблюдаемой в MC4000. Для решения данной задачи была полностью переработана топология как СВЧ-линий, так и цепей автосмещения транзисторов, также выбрана другая компоновка «базового» усилительного элемента – ширина затворной секции транзисторов 4×75 мкм.

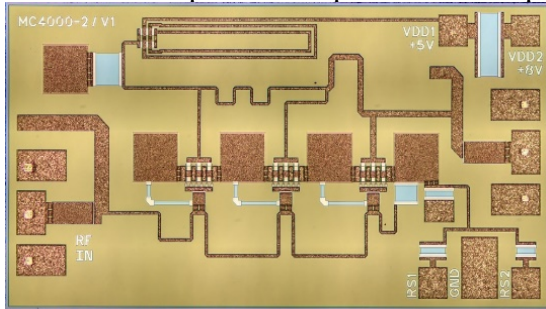


Рисунок 5. Фото MC4000(new).

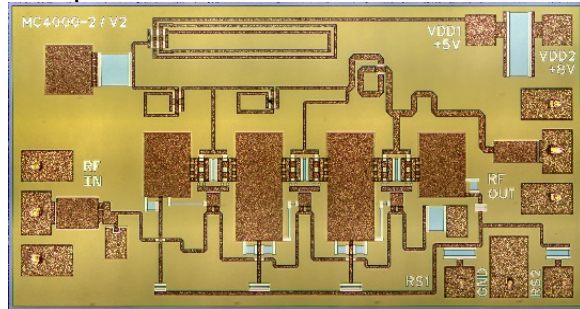


Рисунок 6. Фото MC4000-2.

Для устранения неоднородности «базовый» транзистор в процессе разработки топологии был представлен в виде 2 параллельно соединенных транзисторов с периферией 2×75 мкм. За счет такого представления удалось обнаружить, что причиной возникновения неоднородности является LC-контур, образуемый блокировочными конденсаторами, стоящими в цепи автосмещения и «воздушными мостами» самих транзисторов. Таким образом для устранения паразитного эффекта в данную цепь необходимо было добавить диссипативные потери, тем самым уменьшив добротность колебательного контура. По результатам моделирования между истоками транзисторов был установлен резистор 9 Ом (см.рис.7), что положительным образом сказалось на АЧХ МИС в области 6 ГГц.

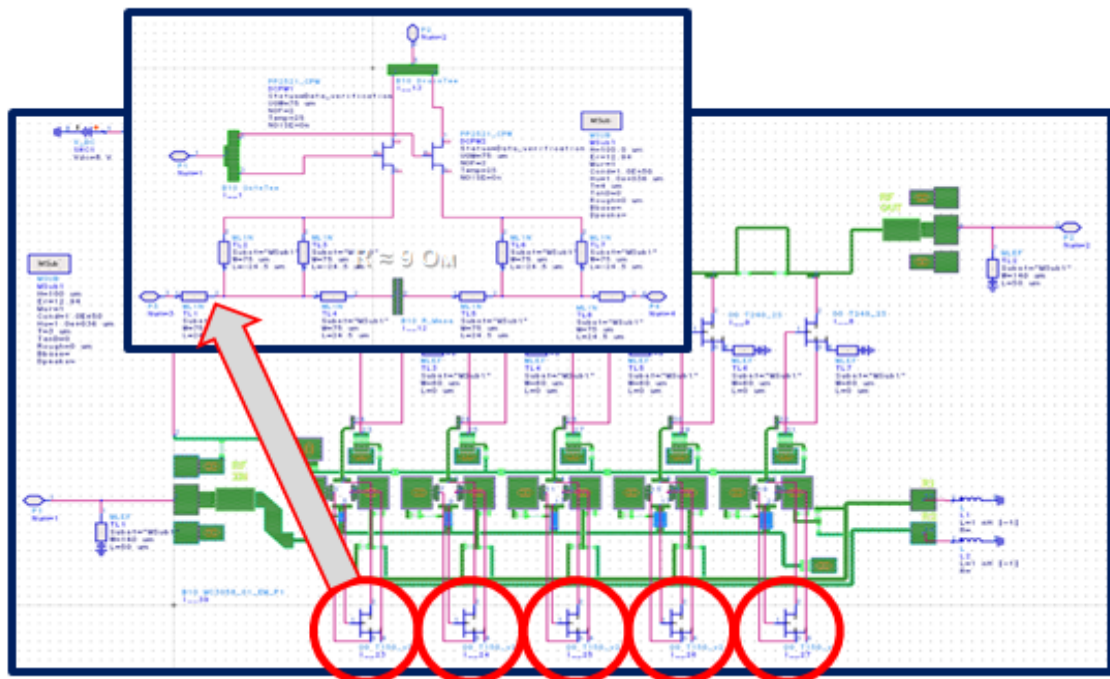


Рисунок 7. Демонстрация принципа представления транзистора 4×75 мкм как 2 параллельно включенных 2×75 мкм. На увеличенном изображении также можно наблюдать подключение резистора между истоками транзисторов.

Результаты измерения параметров МИС, изготовленных по новому технологическому процессу, и их сравнение с предыдущим запуском продемонстрировано на рис.8-9.

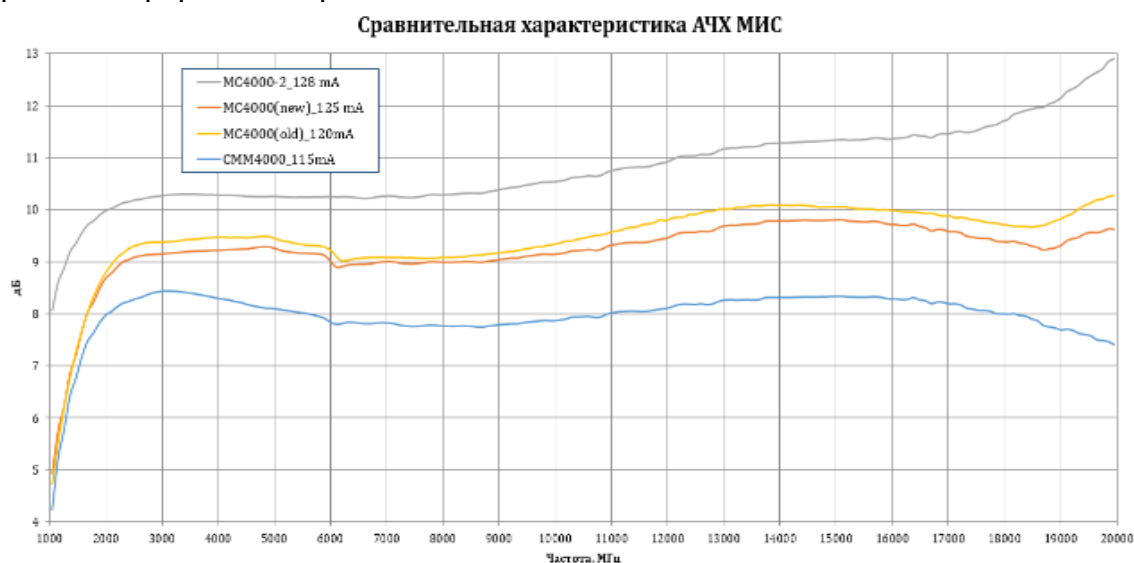


Рисунок 8. Коэффициент усиления доработанных МИС.

3. Заключение

В АО «Микроволновые системы» разработаны и изготовлены по модели фаблесс-фаундри опытные образцы 2 типов усилителей с распределенным усилением MC4000 и MC4000-2, которые могут быть использованы как для pin-to-pin замены МИС CMM4000-BD, так и для изделий чуть более широкого диапазона частот (от 1,5 до 20,0 ГГц). В таблице приведены основные характеристики усилителей, разработанных в АО «Микроволновые системы», по сравнению с замещаемым импортным аналогом.

Таблица 1. Основные параметры МИС распределенных усилителей.

Наименование параметра	Ед. изм.	CMM4000-BD	MC4000 (old)	MC4000 (new)	MC4000-2
Полоса рабочих частот	ГГц	2,0 – 18,0	2,0 – 20,0	2,0 – 20,0	1,5 – 20,0
Коэффициент усиления	дБ	9,0	9,0	8,9	9,8
Уровень выходной мощности при компрессии коэффициента усиления 1 дБ	дБмВт	19,0	19,5	19,5	21,0
КСВН входа	отн.ед.	1,7	2,1	2,0	1,9
КСВН выхода	отн.ед.	1,5	1,8	1,7	1,6
PAE _{макс}	%	≥ 6	≥ 8	≥ 8,2	≥ 10
Напряжение питания	В	5 – 7	5 – 8	5 – 8	5 – 8
Ток потребления (V _{dd} = 5В)	мА	115	120	125	128

Список литературы

1. Кищинский А. А. Мы видим, что можем разговаривать с зарубежными компаниями на равных// Электроника: Наука. Технология. Бизнес. — 2019. — № 9. — С. 10-16.
2. Миннебаев В. М. Мы стремимся разрабатывать компоненты, которые позволят потребителю создать лучшее изделие// Электроника: Наука. Технология. Бизнес. — 2022. — № 6. — С. 12-18.
3. Mimix Broadband, «Datasheet описание CMM4000-BD» [Rev-01-May-07]. Доступно: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/179596/MIMIX/CMM4000-BD.html>
4. Кондратенко А. В., Шишкин Д. А., Сорвачев П. С. Примеры МИС СВЧ, разработанных с использованием различных подходов и инструментов проектирования — полет технической мысли или борьба с ограничениями// Сборник тезисов «Российский форум «Микроэлектроника 2024». 10-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». 23-28 сентября 2024 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА. — С 399-400.