

УДК: 621.375.4

Л.И. Бабак, Ю.В. Федоров, М.В. Черкашин, Ф.И. Шеерман, А.С. Бугаев, Д.Л. Гнатюк, А.А. Коколов, И.М. Добуш, К.С. Дмитриенко, А.С. Сальников, А.Э. Ячменев

Копланарные монолитные усилители Ка-диапазона на основе 0,13 мкм GaAs mHEMT-технологии

Описываются разработка и характеристики монолитных интегральных схем (МИС) одно- и двухкаскадных копланарных усилителей Ка-диапазона на основе отечественной 0,13 мкм GaAs mHEMT-технологии. Создана библиотека моделей активных и пассивных копланарных элементов МИС. Разработка осуществлена с помощью комплекса программ автоматизированного синтеза СВЧ усилителей.

Ключевые слова: СВЧ монолитные интегральные схемы, копланарный усилитель, Ка-диапазон, mHEMT, модели элементов, автоматизированный синтез.

Введение. Основными потребителями СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), функциональных модулей, радиоэлектронных устройств и систем в мм-диапазоне длин волн являются: высокоскоростные (1 Гбит/с и выше) системы передачи данных; системы космической, спутниковой и мобильной связи, радиолокационные системы, включая радары для авиации и флота, автомобильные радары и т.д.; системы наблюдения и радиоуправления и др. Ключевым составляющим элементом этих систем являются СВЧ монолитные усилители.

Разработка монолитных усилителей, особенно в миллиметровом диапазоне волн, связана с решением сложных задач технологии изготовления и проектирования МИС. Проектирование включает этапы построения и верификации моделей активных и пассивных элементов в мм-диапазоне, выбор (расчет, синтез) принципиальной схемы СВЧ усилителя и разработку топологии МИС.

В статье рассматриваются первые в России разработки одно- и двухкаскадных монолитных копланарных усилителей (КУ) Ка-диапазона. КУ изготовлены на базе 0,13 мкм GaAs mHEMT-технологии Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва. Копланарное исполнение благодаря отсутствию сквозных отверстий позволяет улучшить характеристики, а также упростить и сократить технологический цикл изготовления усилителей.

Технология. Используемые mHEMT гетероструктуры на полуизолирующих подложках GaAs выращены в ИСВЧПЭ РАН методом МЛЭ. Для формирования рисунка мезаизоляции, омических контактов и других элементов МИС применялся метод фотолитографии. Грибообразные затворы и переходные затворные площадки изготавливались с помощью электронно-лучевой литографии на установке прецизионной нанолитографии Raith150-Two. Более подробно используемая технология описана в [1].

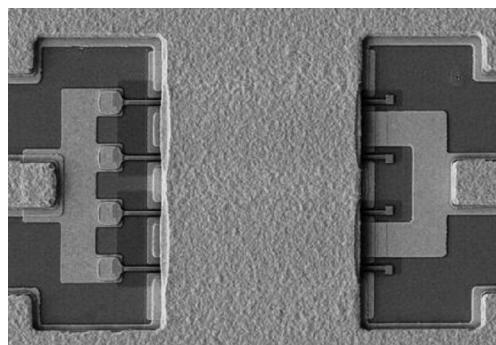
Характеристики и модели элементов. Для разработки КУ использовался базовый mHEMT транзистор с шириной затвора 4×60 мкм (рис. 1). Его фотография приведена на рис. 1, а, а усилительные характеристики $|S_{21}|$, $|H_{21}|$ и G_{\max} , рассчитанные из измеренных S -параметров на пластине в рабочей точке $V_{DS} = 4$ В, $V_{GS} = -1$ В, $I_{DS} = 50$ мА – на рис. 1, б.

Нелинейная табличная модель транзистора построена по результатам измерения S -параметров в различных рабочих точках по методике [2]. После построения моделей активных и пассивных копланарных элементов МИС была разработана библиотека для опытной 0,13 мкм GaAs mHEMT-технологии ИСВЧПЭ РАН [3], она интегрирована в САПР Microwave Office. Модели копланарных элементов исследованы в [4].

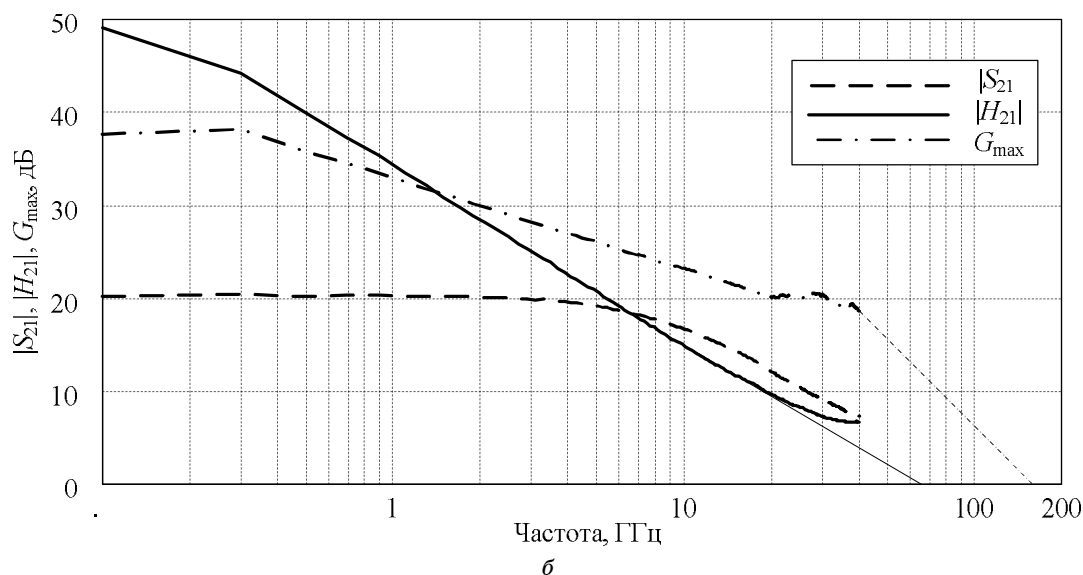
Проектирование. К усилителям предъявлялись следующие требования в диапазоне частот 32–38 ГГц: коэффициент усиления G для однокаскадного КУ не менее 9 дБ, для двухкаскадного – не менее 18 дБ; неравномерность АЧХ – не более $\pm 1,5$ дБ; модули входного и выходного коэффициентов отражения $|S_{11}| \leq 0,316$ (–10 дБ), $|S_{22}| \leq 0,316$ (–10 дБ); выходная мощность P_{out} – несколько милливольт; безусловная устойчивость во всем частотном диапазоне ($k > 1$).

При разработке принципиальных схем КУ использован комплекс программ автоматизированного проектирования (синтеза) СВЧ-усилителей, пассивных корректирующих и согласующих цепей (СЦ) [5, 6]. Синтез входной и выходной СЦ в обоих усилителях вы-

полнен при помощи программ REGION и LOCUS [5] на основе интерактивной методики визуального проектирования. Выходная СЦ синтезирована из условия обеспечения компромисса между усилением, согласованием по выходу и выходной мощностью. Межкаскадная цепь в двухкаскадном усилителе синтезирована при помощи программы автоматического синтеза GENESYN, основанной на генетических алгоритмах [6]. Более подробно процедуры проектирования усилителей рассмотрены в [7, 8].



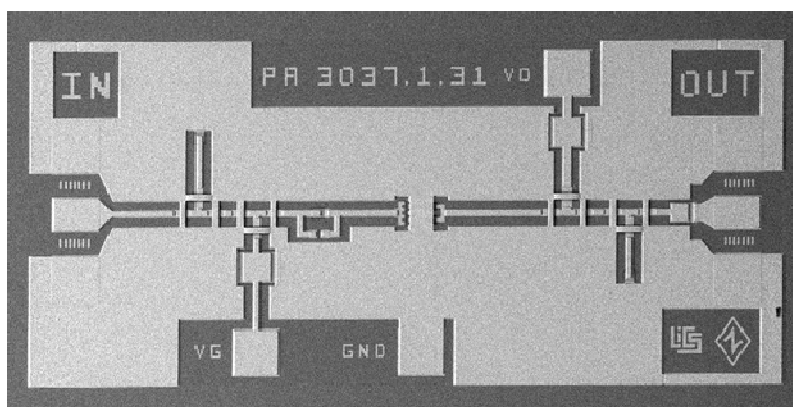
а



б

Рис. 1. Фотография (а) и характеристики (б) mHEMT-транзистора 4×60 мкм

Характеристики усилителей. Разработанные усилители были изготовлены в ИСВЧПЭ РАН. Фотография кристалла однокаскадного КУ показана на рис. 2. На рис. 3 приведены результаты измерений однокаскадного КУ на пластине, выполненные в НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР с помощью зондовой станции CASCADE Summit 11000. На рис. 3, а представлены частотные характеристики усилителя, измеренные на малом сигнале. На рис. 3, б показана амплитудная характеристика КУ на частоте 36 ГГц. В обоих случаях измерения выполнены при напряжении сток-исток транзистора $V_{DS} = 3,5$ В.

Рис. 2. Фотография кристалла однокаскадного КУ (размеры 0,9×1,8 мм²).

Фотография чипа двухкаскадного КУ изображена на рис. 4, а результаты его экспериментальных исследований ($V_{DS} = 3,5$ В) – на рис. 5.

При напряжении питания 3,5 В ток потребления однокаскадных КУ равен 40–50 мА, двухкаскадных – 70–80 мА. Измеренная выходная мощность обоих КУ при сжатии коэффициента усиления на 1 дБ составила $P_{1\text{дБ}} = 6\text{--}8$ дБм.

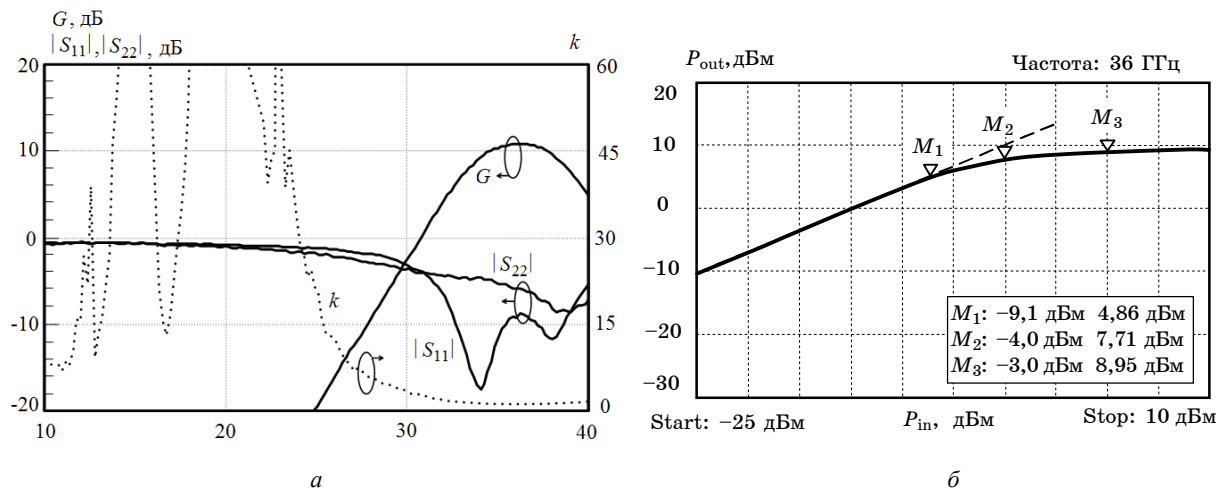


Рис. 3. Экспериментальные частотные характеристики (а) и амплитудная характеристика на частоте 36 ГГц (б) однокаскадного КУ

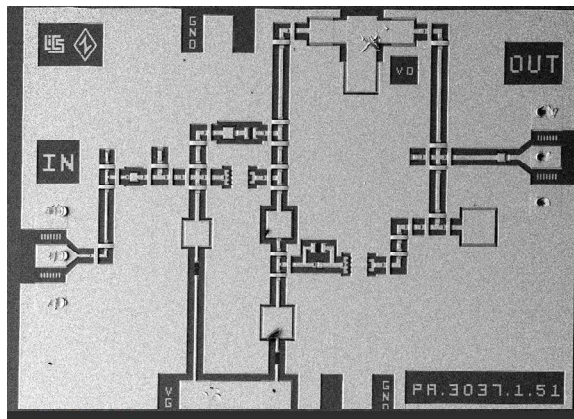


Рис. 4. Фотография кристалла двухкаскадного КУ (размеры 1,5×1,8 мм²)

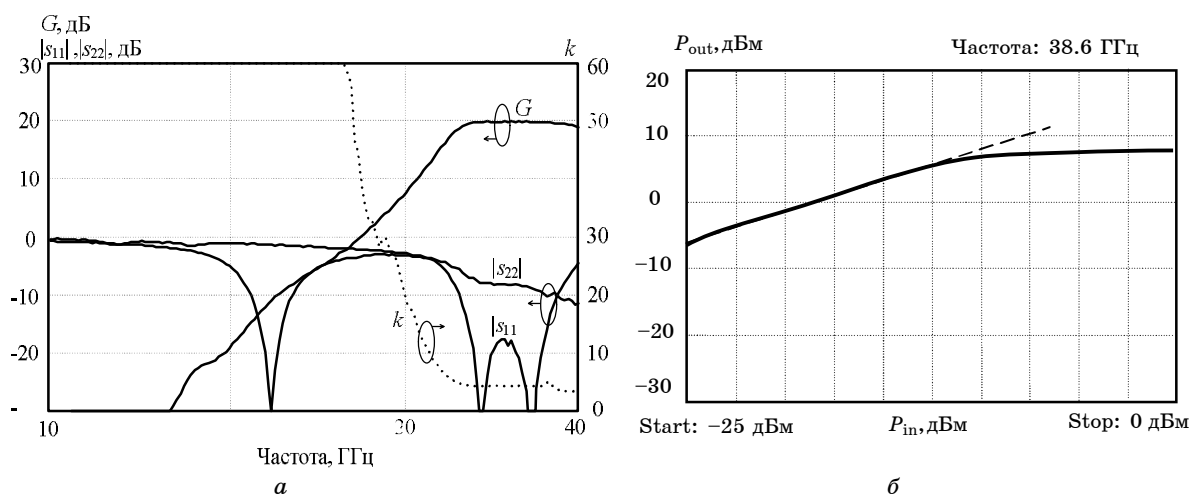


Рис. 5. Экспериментальные частотные характеристики (а) и амплитудная характеристика на частоте 38,6 ГГц (б) двухкаскадного КУ

Заключение. В ходе данной работы был выполнен полный цикл разработки МИС одно- и двухкаскадных копланарных усилителей Ка-диапазона, включая выращивание гетеро-структуры, комплекс технологических операций, измерения и создание библиотеки

моделей активных и пассивных элементов МИС, проектирование и измерения характеристик усилителей на пластине.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ в рамках проектов 08-07-99034-р_офи и 09-07-99020-р_офи, а также в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Нанотехнологии и наноматериалы», «Создание электронной компонентной базы», «Микроэлектроника» (мероприятия 1.1, 1.2.1, 1.2.2, 1.3.1 и 1.3.2, государственные контракты П1418, П1492, П2188, П669, П499, 16.740.11.0092 и 14.740.11.0135).

Литература

1. Федоров Ю.В. Монолитные интегральные схемы малошумящих усилителей КВЧ-диапазона на GaAs рНЕМТ-гетероструктурах / Ю.В. Федоров, Д.Л. Гнатюк, Г.Б. Галиев и др. // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 49–55.
2. Дмитриенко К.С. Построение табличной нелинейной модели рНЕМТ-транзистора / Дмитриенко К.С., Бабак Л.И. // Сб. трудов 19-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» / – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 1, – С. 119–120.
3. Сальников А.С. Разработка библиотеки элементов для проектирования отечественных гетероструктурных СВЧ МИС в среде Microwave Office / А.С. Сальников, А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман // Доклады ТУСУРА. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 157–160.
4. Добуш И.М. Исследование копланарных элементов СВЧ монолитных интегральных схем / И.М. Добуш, А.А. Коколов, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРА. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 38–41.
5. Бабак Л.И. Комплекс программ «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей и пассивных цепей / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев и др. – Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». – Томск: В-Спектр, 2007. – Ч. 2. – С. 113–115.
6. Бабак Л.И. Программа синтеза согласующих цепей на основе генетического алгоритма / Л.И. Бабак, В.А. Вьюшков // Сб. трудов 16-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: «Вебер», 2006. – Т. 1. – С. 209–210.
7. Черкашин М.В. Проектирование однокаскадного монолитного усилителя Ka-диапазона с использованием комплекса программ автоматизированного синтеза / М.В. Черкашин, А.А. Коколов, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРА. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 25–29.
8. Черкашин М.В. Автоматизированное проектирование двухкаскадного копланарного монолитного усилителя Ka-диапазона / М.В. Черкашин, А.А. Коколов, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРА. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 30–33.

Бабак Леонид Иванович

Канд. техн. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии»,
доцент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРА
Дом. тел.: +7 (382-2) 41-47-17, сот. тел.: +7-960-969-91-52
Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

Федоров Юрий Владимирович

Зав. лаб. института СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва
Тел.: +7 (495) 123-74-66
Эл. почта: yuraf2002@mail.ru

Черкашин Михаил Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП, декан факультета вычислительных систем ТУСУРА
Тел.: +7-906-948-86-48
Эл. почта: mik_cher@mail.ru

Шеерман Федор Иванович

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП ТУСУРА
Тел.: +7-913-805-94-54
Эл. почта: sfi1493@ms.tusur.ru

Бугаев Александр Сергеевич

Зав. лаб. ИСВЧПЭ РАН, г. Москва
Тел.: +7 (495) 123-74-66

Гнатюк Дмитрий Леонидович

Мл. науч. сотрудник ИСВЧПЭ РАН, г. Москва
Тел.: +7 (495) 123-62-22

Коколов Андрей Александрович

Мл. науч. сотрудник каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7-923-405-93-59
Эл. почта: kokolovaa@gmail.com

Добуш Игорь Мирославович

Аспирант каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7-923-402-92-86
Эл. почта: igadobush@gmail.com

Дмитриенко Константин Сергеевич

Инженер каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7-903-913-81-03
Эл. почта: kostan@sibmail.com

Сальников Андрей Сергеевич

Мл. науч. сотрудник каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7-913-866-44-65
Эл. почта: ansalnikov@gmail.com

Ячменев Александр Эдуардович

Мл. науч. сотрудник ИСВЧПЭ РАН, г. Москва
Тел.: +7 (495) 123-62-22

Babak L.I., Fedorov Yu.V., Cherkashin M.V., Sheyerman F.I., Bugaev A.S., Gnatyuk D.L., Kokolov A.A., Dobush I.M., Dmitrienko K.S., Salnikov A.S., Yachmenev A.E.

Ka-band coplanar MMIC amplifiers based on 0.13 μm GaAs mHEMT process

The development and performances of Ka-band single-stage and two-stage coplanar MMIC amplifiers, which are based on the domestic 0.13 μm GaAs mHEMT technology, are presented. The PDK containing active and passive coplanar MMIC element models has been created. The amplifier design is performed with the use of automated synthesis software tools.

Keywords: MMIC, coplanar amplifier, Ka-band, mHEMT, element models, automated synthesis.
