

УДК 621.375.4

А.А. Коколов, Л.И. Бабак

Разработка копланарного монолитного усилителя Ка-диапазона со сложением мощности

Рассматривается проектирование двухкаскадного копланарного монолитного усилителя Ка-диапазона с использованием схем сложения мощности 4 транзисторов в выходном каскаде. Усилитель выполняется на основе отечественной гетероструктурной 0,13 мкм GaAs mHEMT-технологии. Описывается применение при проектировании комплекса программ автоматизированного синтеза СВЧ транзисторных усилителей и пассивных цепей.

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

Введение. Одной из главных тенденций развития современных радиоэлектронных и телекоммуникационных систем является расширение полосы частот и освоение все более высокочастотных диапазонов (до нескольких десятков и в перспективе сотен гигагерц) с целью повышения емкости каналов, скорости и качества передачи данных. В связи с этим актуальной задачей является разработка монолитных интегральных схем (МИС) мм-диапазона волн и, в частности, усилителей мощности (УМ).

Для получения высокого уровня выходной мощности транзистор в оконечном каскаде УМ должен иметь значительную ширину затвора, это противоречит требованию достижения высоких рабочих частот. Поэтому в оконечных каскадах монолитных УМ часто используется суммирование мощности нескольких транзисторов с меньшей шириной затвора [1, 2]. В настоящей работе рассматривается проектирование двухкаскадного монолитного УМ диапазона 30–37,5 ГГц со сложением мощности, который выполняется на базе 0,13 мкм GaAs mHEMT-технологии ИСВЧПЭ РАН (г. Москва). Описывается применение при разработке УМ комплекса программ автоматизированного синтеза СВЧ транзисторных усилителей, пассивных корректирующих (КЦ) и согласующих (СЦ) цепей [3,4].

Построение модели транзистора и оценка выходной мощности. К усилителю предъявлялись следующие требования: коэффициент усиления G не менее 18 дБ; неравномерность АЧХ не более ± 1 дБ; выходная мощность P_{out} не менее 250 мВт (24,0 дБм); модули входного и выходного коэффициентов отражения $|s_{11}| \leq 0,316$ (–10 дБ), $|s_{22}| \leq 0,316$ (–10 дБ); усилитель должен быть безусловно устойчивым во всем частотном диапазоне ($k > 1$).

В качестве базового активного элемента для разработки УМ выбран mHEMT-транзистор с шириной затвора 4×60 мкм. Его нелинейная табличная модель построена на основе измерения S -параметров в различных рабочих точках по методике [5], она использована для проектирования УМ. Фотография и выходные ВАХ транзистора представлены на рис. 1.

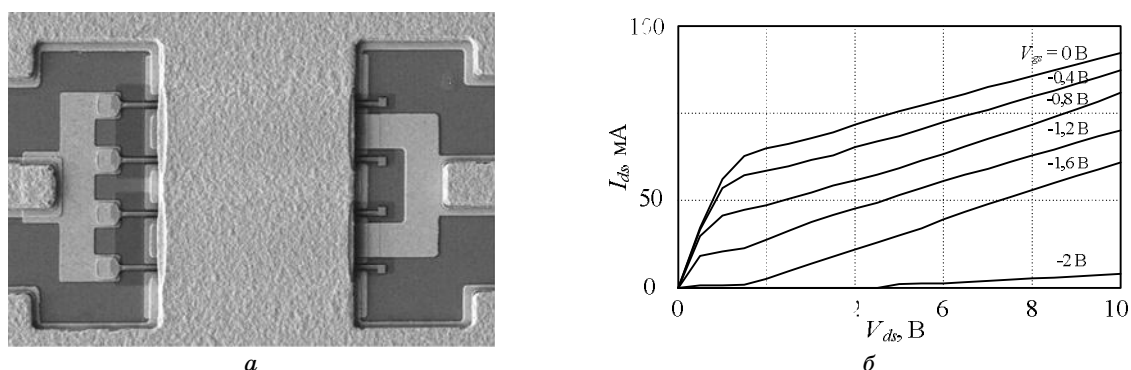


Рис. 1. Фотография (а) и выходные ВАХ (б) 0,13 мкм GaAs mHEMT-транзистора с шириной затвора 4×60 мкм

Для обеспечения требований была выбрана рабочая точка $V_{ds} = 5$ В, $V_{gs} = -1,2$ В, обеспечивающая линейный режим работы транзистора. По ВАХ можно оценить максимальную выходную мощность, которую транзистор может отдать в нагрузку:

$$P_{\text{out}} = \frac{(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \cdot (U_{\text{max}} - U_{\text{min}})}{8}. \quad (1)$$

Принимаем, что $I_{\text{max}} - I_{\text{min}} = 65 \text{ мА}$, а $U_{\text{min}} - U_{\text{max}} = 9 \text{ В}$. Подставляя эти значения в (1), получаем, что выходная мощность равна $P_{\text{out}} = 73 \text{ мВт} = 18,6 \text{ дБм}$. Несмотря на то, что оценка по ВАХ является грубой и обычно выходная мощность транзистора падает с ростом частоты, данный простой расчет позволяет заключить, что для достижения требуемых параметров необходимо суммировать мощности от 4 транзисторов ($P_{\text{out}} = 4 \times 73 \text{ мВт} = 292 \text{ мВт}$). Максимальное усиление транзистора на частоте 37 ГГц в данном режиме равно 12,8 дБ, следовательно, два усилительных каскада обеспечат требуемое усиление 18 дБ.

Описание процедуры проектирования. На рис. 2 представлена структурная схема двухкаскадного УМ со сложением мощности от 4 транзисторов. Для удобства и простоты практической реализации выбрана схема сложения с параллельным включением усилительных каскадов, в которой цепи деления и сложения мощности образованы путем «разделения» СЦ и выполняют также функцию согласования импедансов [1, 2].

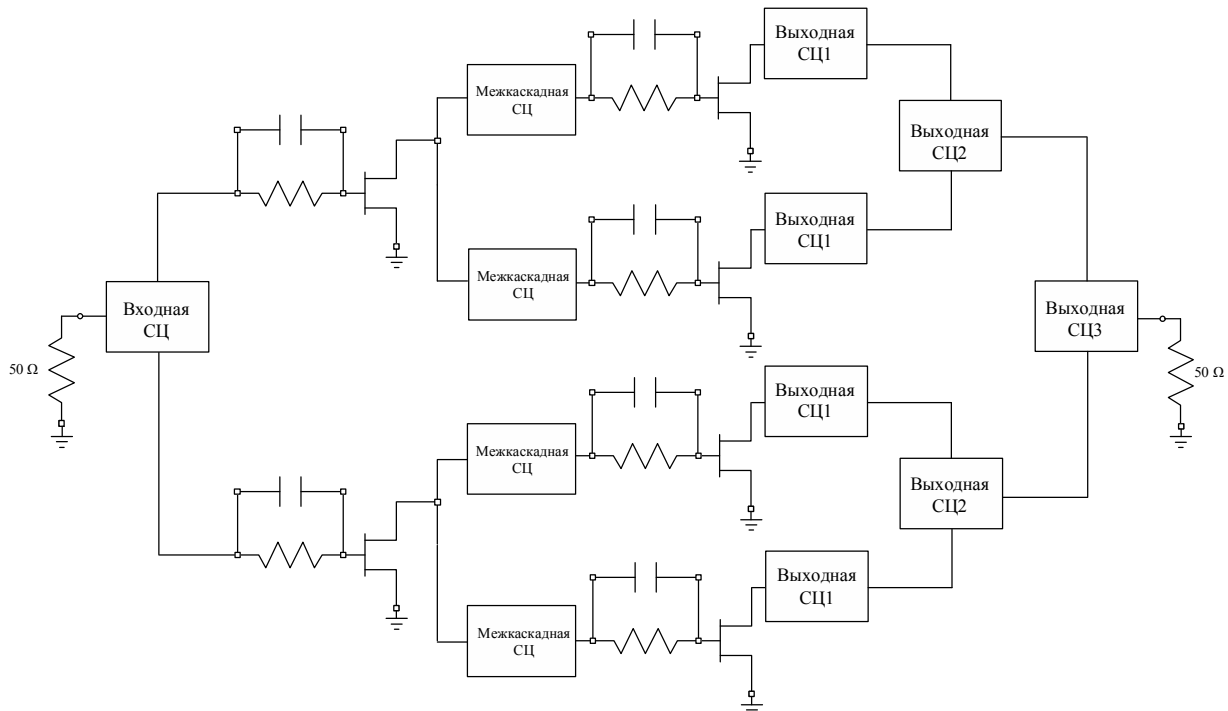


Рис. 2. Структурная схема двухкаскадного УМ

Проектирование УМ со сложением мощности выполнено на основе подхода [1, 2]. На первом этапе осуществляется расчет УМ в одном суммируемом канале (канального усилителя). Особенностью является то, что сопротивления генератора и нагрузки канального усилителя должны быть взяты равными $NZ_0 = 4 \times 50 = 200 \text{ Ом}$, где $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ – сопротивление тракта; $N = 4$ – число суммируемых каналов [1].

Порядок проектирования двухкаскадного канального УМ с использованием интерактивных «визуальных» процедур аналогичен рассмотренному в [6]. Проектирование начинается с синтеза выходной СЦ оконечного каскада. Для этого путем load-pull моделирования транзистора в среде Microwave Office (MWO) на нескольких частотах рабочего диапазона (30, 34, 37 ГГц) были получены области допустимых значений (ОДЗ) коэффициента отражения нагрузки, в пределах которых выходная мощность составляет не менее 17,5 дБм. По найденным областям с помощью программы «визуального» проектирования LOCUS [3] синтезирована выходная СЦ на идеальных элементах (рис. 3, а). Для удобства последующей реализации сумматора мощности выходная СЦ была модифицирована в среде MWO (рис. 3, б).

На следующем шаге рассчитана параллельная RC-цепь на входе транзистора оконечного каскада (см. рис. 1), обеспечивающая его устойчивость и выравнивание АЧХ. Затем с помощью программы GENESYN, базирующейся на генетических алгоритмах [4], последовательно синтезированы входная и межкаскадная СЦ канального усилителя. При этом критерием являлось достижение минимального уровня отражений в заданной поло-

се частот. Наконец, полученная схема канального усилителя оптимизирована в среде MWO для реализации комплекса требуемых характеристик.

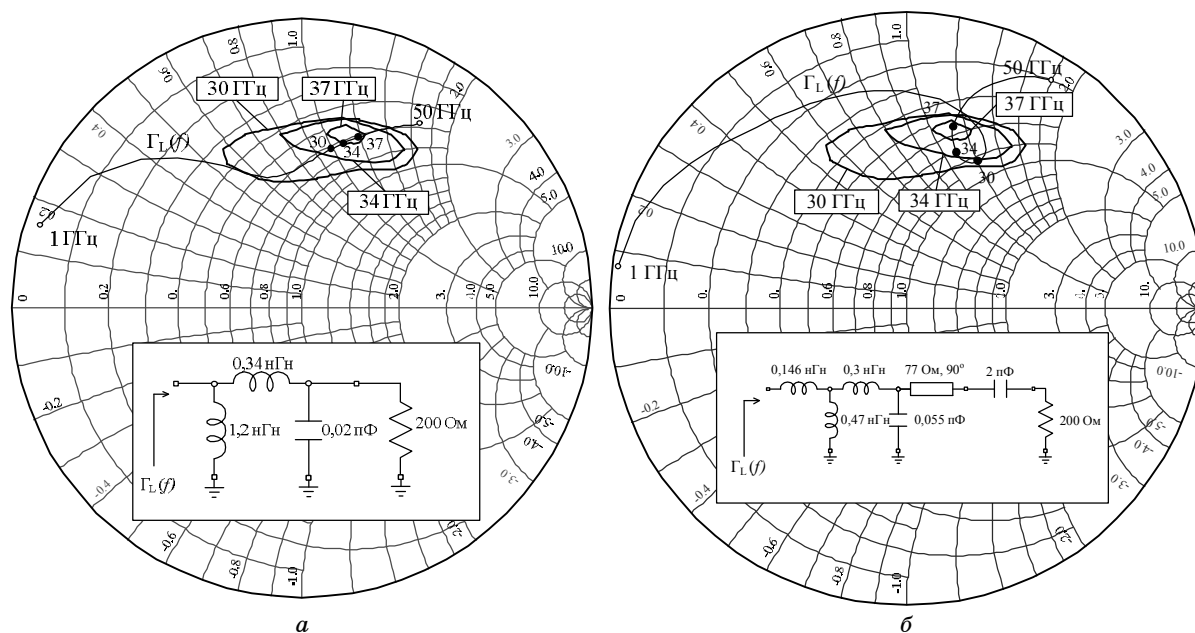


Рис. 3. ОДЗ и годографы на плоскости коэффициента отражения нагрузки для выходной СЦ, синтезированной при помощи LOCUS (а) и модифицированной в MWO (б)

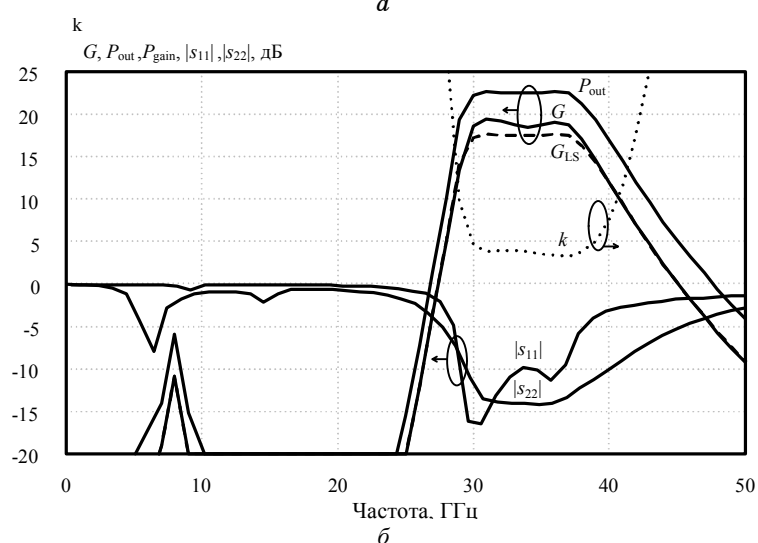
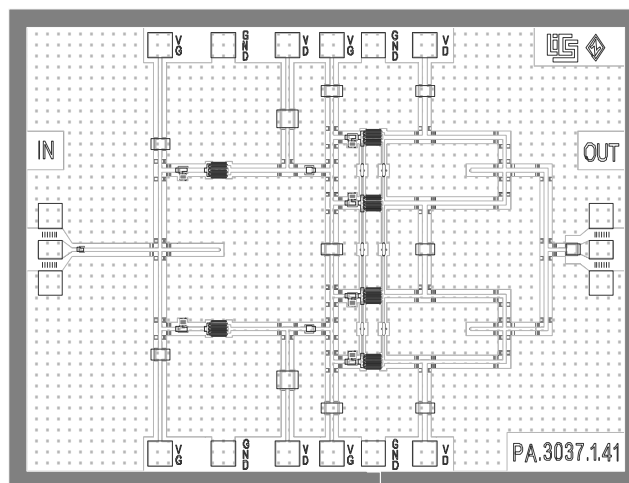


Рис. 4. Топология (а) и результаты моделирования (б) монолитного УМ

На втором этапе проектирования УМ (см. рис. 1) выполнен расчет цепей деления и суммирования мощности в обоих каскадах путем преобразования СЦ канального усилителя [1, 2]. На заключительном этапе идеальные пассивные элементы в схеме УМ заменены моделями монолитных элементов, выполненных на копланарных линиях, добавлены цепи питания и проведена окончательная параметрическая оптимизация усилителя в среде MWO. Разработанная топология монолитного УМ на копланарных линиях показана на рис. 4,а (размеры кристалла 2,0×2,7 мм).

Результаты моделирования малосигнальных характеристик усилителя, а также выходной мощности P_{out} и коэффициента усиления G_{LS} при входной мощности $P_{in}=5$ дБм показаны на рис. 4,б ($V_{ds}=5$ В). В полосе частот 30–37,5 ГГц усилитель обеспечивает коэффициент усиления $G = 18$ дБ, выходную мощность $P_{out}=22,5$ дБм (180 мВт) и согласование по входу и выходу не хуже –10 дБ. Снижение выходной мощности по сравнению с приведенной ранее оценкой обусловлено в основном потерями в суммирующей цепи.

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. Marsh S. Practical MMIC design. – London; Boston: Artech House, 2006. – 358 p.
2. Hek A.P. Design, Realization and Test of GaAs-based Monolithic Integrated X-band High-Power Amplifier: PhD thesis. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002. – 322 p.
3. 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». – Томск: В-Спектр, 2007. – Ч. 2. – С. 113–115.
4. 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.
5. Дмитриенко К.С. Построение табличной нелинейной модели рНЕМТ-транзистора / К.С. Дмитриенко, Л.И. Бабак // Сб. трудов 19-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 1. – С. 119–120.
6. Проектирование монолитного усилителя мощности диапазона 8-12 ГГц с помощью программ автоматизированного синтеза / Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, А.А. Баров, В.А. Вьюшков // Сб. докл. междунар. научн.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. – Ч. 1. – С. 154–159.

Коколов Андрей Александрович

Мл. науч. сотрудник каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Тел.: +7-923-405-93-59
Эл. почта: kokolovaa@gmail.com

Бабак Леонид Иванович

Канд. техн. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии», доцент каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

A.A. Kokolov, L.I. Babak

Design of Ka-band coplanar MMIC amplifier with power combining

The design of Ka-band two-stage coplanar MMIC amplifier with four transistors power combining in the output stage is considered. The amplifier is manufactured with the use of the domestic 0,13 μm GaAs mHEMT technology. The application of software tools for automated synthesis of microwave transistor amplifiers and passive circuits is described.

Keywords: MMIC, coplanar amplifier, Ka-band, mHEMT, power combining, automated synthesis.