

УДК 621.375.4

В.Г. Мокеров, Л.И. Бабак, Ю.В. Федоров, М.В. Черкашин, Ф.И. Шеерман,  
А.С. Бугаев, А.Л. Кузнецов, Д.Л. Гнатюк

## Разработка комплекта монолитных малошумящих усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs pHEMT-технологии

Приводятся результаты разработки на базе отечественной 0,15 мкм GaAs pHEMT-технологии первого в России комплекта монолитных интегральных схем (МИС) малошумящих усилителей (МШУ) X-диапазона с параметрами на уровне зарубежных аналогов. Применение методик и программ визуального проектирования СВЧ-усилителей позволило получить высокие качественные характеристики, упростить и ускорить разработку МИС МШУ.

**Ключевые слова:** СВЧ монолитные интегральные схемы, технология, pHEMT, малошумящий усилитель, X-диапазон, автоматизированный синтез, визуальное проектирование.

### Введение

Применение в радиоэлектронных системах (РЭС) СВЧ диапазона монолитных интегральных схем (МИС) позволяет значительно улучшить их основные технические параметры, кардинально снизить массу и габариты аппаратуры, повысить надежность функционирования, уменьшить трудоемкость и себестоимость изготовления радиоэлектронных изделий в серийном производстве. На основе СВЧ МИС создаются современные средства космической, спутниковой, персональной и сотовой связи, телекоммуникационные системы, гигабитовые цифровые системы передачи данных, глобальные информационные и навигационные системы, системы цифрового телевидения и т.д. Важным элементом таких систем являются, в частности, монолитные малошумящие усилители (МШУ).

В настоящее время в США, Японии, ряде стран Европы и Южной Азии разработаны и внедрены в промышленное производство перспективные гетероструктурные технологии изготовления СВЧ МИС. Производится широкий спектр различных СВЧ МИС (включая МШУ), что позволяет использовать их в РЭС самого разнообразного назначения.

В России также создаются подобные технологии. Примером могут служить опытные (0,1...0,15) мкм HEMT (pHEMT, mHEMT) технологии на основе материалов GaAs, InP и GaN, разработанные в Институте СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва) [1]. Они позволяют изготавливать СВЧ МИС с характеристиками, соответствующими зарубежным образцам.

В статье приводятся результаты разработки на базе 0,15 мкм GaAs pHEMT-технологии ИСВЧПЭ РАН первого в России комплекта МИС МШУ X-диапазона с параметрами на уровне лучших зарубежных аналогов. Применение методик и программ визуального проектирования СВЧ-усилителей [2–6] позволило получить высокие качественные характеристики, упростить и ускорить разработку монолитных МШУ.

### Технология изготовления GaAs pHEMT-транзисторов и МИС

*Описание pHEMT гетероструктуры.* СВЧ МИС изготавливались на основе pHEMT-гетероструктур, выращенных на полуизолирующих подложках GaAs ориентации (100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИСВЧПЭ РАН [1]. Для получения большой подвижности электронов в канале при не слишком высокой концентрации электронов, необходимой для малошумящих СВЧ-приборов, была проведена оптимизация pHEMT гетероструктуры с односторонним  $\delta$ -Si легированием. Измерение электрофизических параметров гетероструктуры методом эффекта Холла дало следующие значения подвижности и концентрации 2D-электронного газа:  $\mu_e=7400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $n_s=1,4\times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при  $T = 300 \text{ К}$  и  $\mu_e=25500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $n_s=1,87\times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при  $T = 77 \text{ К}$ .

*Технология изготовления GaAs pHEMT МИС.* Технология изготовления МИС [1] включала последовательность хорошо отработанных технологических операций, включающих изоляцию приборов травлением мезаструктуры, изготовление омических контактов Ni/Ge/Au, двухступенчатую электронно-лучевую литографию «грибообразных» затворов ( $L_g = 0,15 \text{ мкм}$ ) с использованием трехслойной системы резистов PMMA/PMGI/PMMA, селективное жидкостное травление подзатворной канавки, металлизацию затворов напылением Ti/Pd/Au, нанесение диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$  для конденсаторов и пассивации затворов, а также последующую металлизацию межсоединений с использованием технологии изготовления «воздушных мостов» и гальванического осаждения Au.

**Характеристики транзисторов.** Базовыми при разработке МИС являлись предварительно отработанные с высокой степенью воспроизводимости рНЕМТ транзисторы с топологией затворов  $2 \times 75$  и  $4 \times 75$  мкм (рис. 1, а). На рис. 1, б показаны вольтамперные характеристики рНЕМТ-транзистора. Их особенностью является то, что благодаря соответствующей оптимизации гетероструктуры транзистор может функционировать при нулевом напряжении на затворе ( $V_{gs} = 0$  В) с сохранением высоких параметров. При проектировании усилителей это позволяет отказаться от реализации специальных цепей смещения и упростить конструкцию МИС. Типовые параметры транзисторов следующие: начальный ток стока 100–150 мА/мм, крутизна характеристики (при  $V_{gs} = 0$  В) – 400 мСм/мм, напряжение отсечки – 0,4 В.

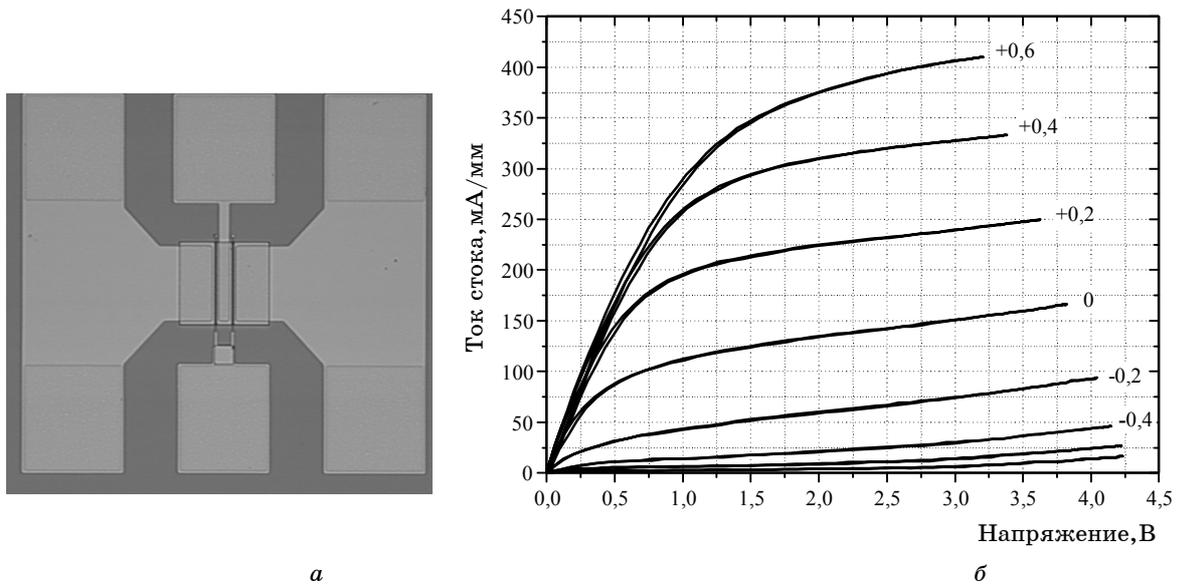


Рис. 1. Топология рНЕМТ-транзистора с шириной затвора  $2 \times 75$  мкм (а) и его типовые вольтамперные характеристики (б)

На рис. 2 приведены частотные зависимости коэффициента усиления по току  $H_{21}$  и  $U$ -функции (Masons' Gain) для рНЕМТ транзисторов с шириной затворов  $2 \times 75$  и  $4 \times 75$  мкм. Предельная частота усиления по току составляет  $f_t = 50$  ГГц, по мощности –  $f_{max} = 100$  ГГц. Транзистор  $4 \times 75$  мкм на частоте 12 ГГц имеет минимальный коэффициент шума  $F_{min} \approx 0,5$  дБ и соответствующий коэффициент усиления по мощности  $G_{dss} \approx 10$  дБ ( $V_{gs} = 0$  В,  $V_{ds} = 2,5$  В).

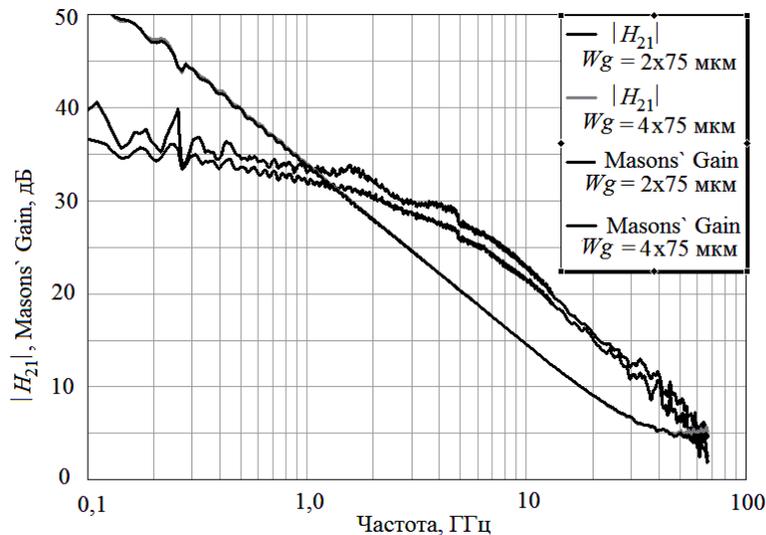


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента усиления по току  $H_{21}$  и  $U$ -функции рНЕМТ транзистора

### Проектирование монолитных малошумящих усилителей X-диапазона

**Используемые инструментальные средства проектирования и модели транзисторов.** Разработка многокаскадных МШУ СВЧ-диапазона является трудоемкой процедурой. Ускорить проектирование и улучшить качественные показатели усилителей позволяет комплекс программ Microwave Look [2–4], разработанный в Лаборатории интеллектуальных компьютерных систем (ЛИКС) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). В нем реализованы процедуры «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей, а также пассивных корректирующих (КЦ) и согласующих (СЦ) цепей [5–7]. Процесс проектирования усилителей с КЦ и СЦ основан на общем декомпозиционном подходе к синтезу активных СВЧ-цепей [8] и содержит два основных этапа: 1) построение на заданных частотах областей допустимых значений (ОДЗ) иммитанса или коэффициента отражения КЦ (СЦ), исходя из требований к характеристикам усилителя; 2) синтез (определение структуры и значений элементов) КЦ (СЦ) по полученным ОДЗ.

Комплекс Microwave Look включает в себя программы AMP, REGION и LOCUS. Программы AMP и REGION [2, 3] предназначены для получения ОДЗ иммитанса или коэффициента отражения КЦ и СЦ. Программа LOCUS [2, 4, 5] позволяет осуществить интерактивный синтез двухполюсных КЦ и реактивных СЦ умеренной сложности (от 2 до 6 элементов) по ОДЗ.

При проектировании МШУ использовались S-параметры транзисторов, измеренные в режиме  $V_{gs}=0$  В,  $V_{ds}=3,0$  В на пластине с помощью векторного анализатора цепей E-8361A фирмы Agilent в диапазоне частот 0,01–67 ГГц. На их основе были разработаны малосигнальная эквивалентная схема, шумовая модель Поспешальского и нелинейная модель ТОМ2 в среде Microwave Office для моделирования вольт-амперных характеристик.

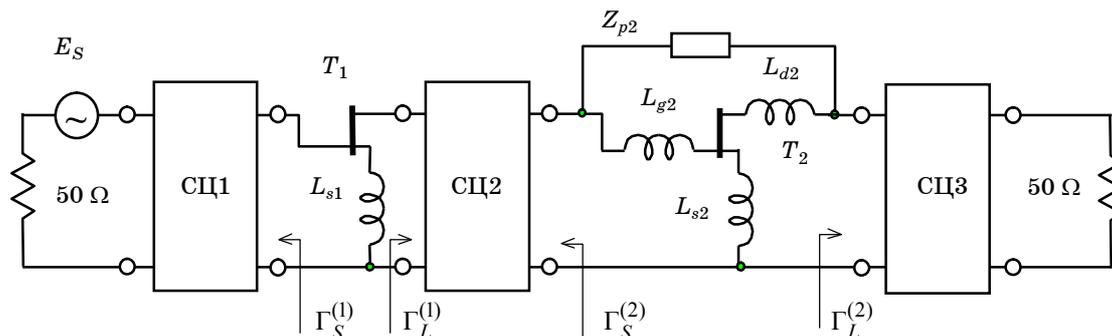


Рис. 3. Структурная схема двухкаскадного МШУ X-диапазона

**Визуальное проектирование двухкаскадного МШУ.** К двухкаскадному усилителю предъявлялись следующие требования в диапазоне частот 8...12 ГГц: коэффициент усиления  $G$  не менее 20 дБ; неравномерность коэффициента усиления в полосе рабочих частот  $\Delta G$  не более  $\pm 1,0$  дБ; коэффициент шума  $F$  не более 1,0 дБ; модули входного и выходного коэффициентов отражения  $m_1 = |s_{11}| \leq 0,33$  (–9,63 дБ),  $m_2 = |s_{22}| \leq 0,33$  (–9,63 дБ); безусловная устойчивость во всем частотном диапазоне ( $k > 1$ ).

Выбранная структурная схема двухкаскадного МШУ приведена на рис. 3. В усилителе используются входная (СЦ1), межкаскадная (СЦ2) и выходная (СЦ3) реактивные согласующие цепи. Во втором каскаде для выравнивания АЧХ и обеспечения устойчивости включена цепь параллельной обратной связи – ОС ( $Z_{p2}$ ). Кроме того, в обоих каскадах присутствует последовательная ОС ( $L_{s1}$  и  $L_{s2}$ ) для дополнительного повышения устойчивости и улучшения согласования каскадов по входу.

Следует отметить, что при проектировании СВЧ усилительных каскадов с реактивными СЦ на входе и выходе могут быть построены два типа допустимых областей на комплексных плоскостях коэффициентов отражения генератора  $\Gamma_S$  или нагрузки  $\Gamma_L$  [7]. Первый тип – так называемые *полные* ОДЗ, они строятся на начальном шаге проектирования, когда ни одна из СЦ еще не синтезирована. Полная ОДЗ содержит все допустимые значения (точки)  $\Gamma_S$  или  $\Gamma_L$ , удовлетворяющие комплексу требований к характеристикам усилительного каскада на рассматриваемой частоте (усиление, шум, согласование на входе и выходе, устойчивость). После того как одна из СЦ спроектирована, строятся так называемые «*односторонне-нагруженные*» ОДЗ. Они содержат все допустимые значения

$\Gamma_S$  или  $\Gamma_L$ , удовлетворяющие комплексу требований к характеристикам каскада при условии, что уже спроектированная СЦ подключена к транзистору.

Первый этап проектирования двухкаскадного усилителя заключался в синтезе входной цепи СЦ1. С помощью программы REGION были получены полные ОДЗ на плоскости  $\Gamma_S^{(1)}$  в частотных точках 8, 10 и 12 ГГц (рис. 4). При этом задавались широкие допуски на коэффициент усиления первого каскада ( $7 \text{ дБ} \leq G^{(1)} \leq 11 \text{ дБ}$ ), предъявлялись также требования к его коэффициенту шума ( $F^{(1)} \leq 0,6 \text{ дБ}$ ), коэффициентам отражения на входе ( $m_1^{(1)} \leq 0,3$ ) и выходе ( $m_2^{(1)} \leq 0,5$ ). Величина индуктивности  $L_{s1} = 0,28 \text{ нГн}$  выбиралась в интерактивном режиме таким образом, чтобы при заданных ограничениях ОДЗ существовали и были максимально широкими. Кроме того, получены круговые области устойчивости на частотах вне рабочего диапазона, удовлетворяющие условиям  $m_1^{(1)} \leq 1$ ,  $m_2^{(1)} \leq 1$  (изображены на рис. 4 штриховыми линиями). По найденным ОДЗ и областям устойчивости с помощью программы LOCUS синтезирована входная цепь СЦ1, точки годографа  $\Gamma_S^{(1)}(f)$  которой на заданных частотах попадают в соответствующие ОДЗ (см. рис. 4).

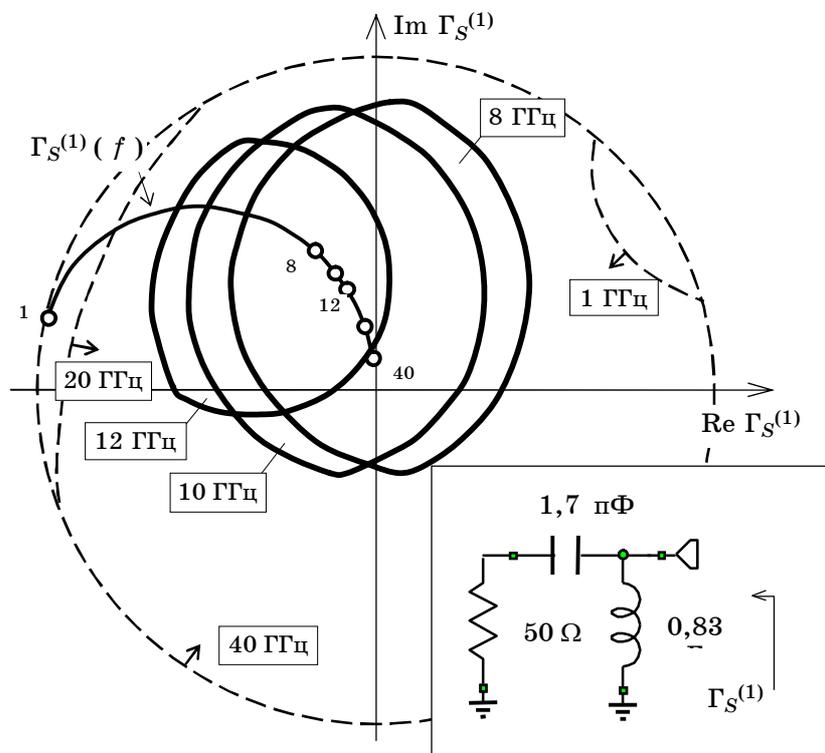


Рис. 4. Полные ОДЗ, области устойчивости и годограф входной цепи СЦ1 на плоскости  $\Gamma_S^{(1)}$

Моделирование показало, что в рабочем диапазоне частот первый каскад с подключенной входной цепью СЦ1 при условии комплексно-сопряженного согласования на выходе транзистора Т1 имеет спад АЧХ около 5 дБ/октава (рис. 5).

На следующем этапе было выполнено проектирование второго каскада с цепью параллельной ОС (рис. 6,а). С помощью программы АМР были получены ОДЗ на плоскости импеданса цепи ОС  $Z_{P2}$ . В этом случае для компенсации спада коэффициента усиления первого каскада был задан подъем АЧХ второго каскада порядка 5 дБ/октава:  $10 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 12 \text{ дБ}$  для частоты 8 ГГц,  $11 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 13 \text{ дБ}$  для частоты 10 ГГц и  $12 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 14 \text{ дБ}$  для частоты 12 ГГц. Остальные требования к характеристикам каскада следующие:  $F^{(2)} \leq 2,5 \text{ дБ}$ ,  $k^{(2)} \geq 1$ . Заметим, что программа АМР позволяет определять ОДЗ импеданса цепи ОС при включенных на входе и выходе каскада идеальных СЦ, которые могут быть настроены, например, на максимум коэффициента усиления, минимум коэффициента шума и т.д. [3]. В рассматриваемом случае построение ОДЗ выполнялось при условии комплексно-сопряженного согласования на входе и выходе каскада.

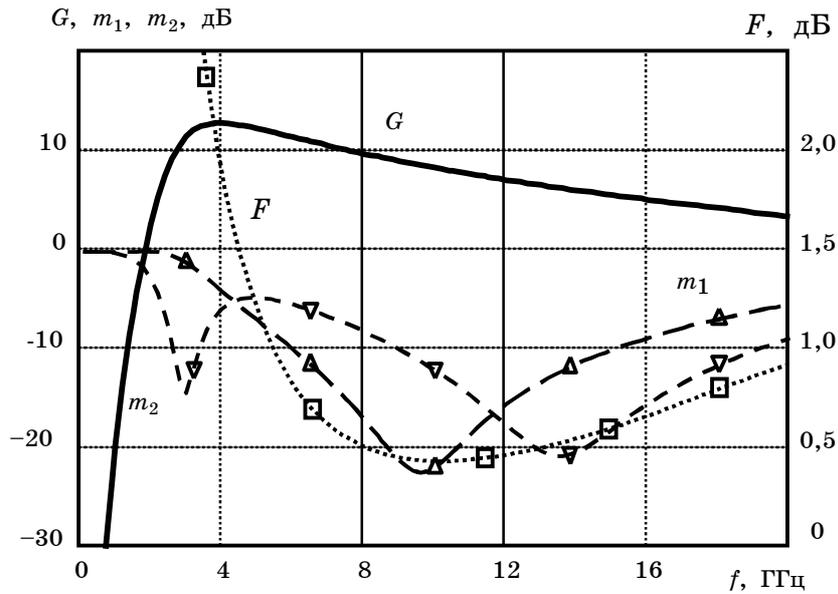


Рис. 5. Результаты моделирования первого каскада усилителя с подключенной входной цепью СЦ1

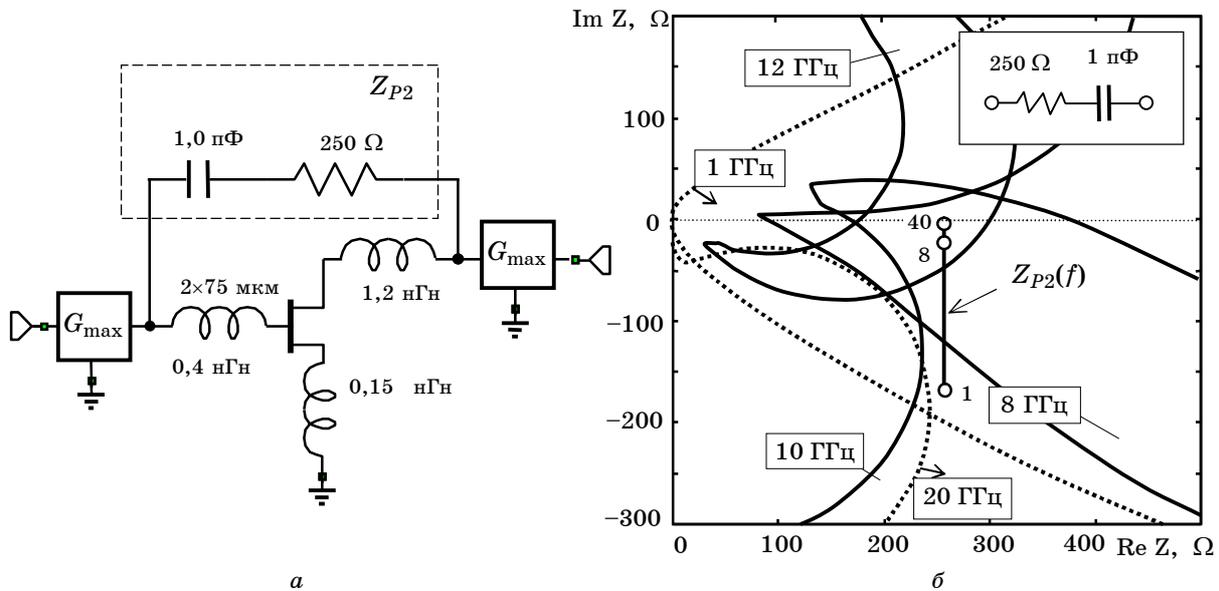


Рис. 6. Схема второго каскада (а); ОДЗ, области устойчивости и годограф цепи параллельной ОС на плоскости импеданса  $Z_{P2}$  (б)

Величины индуктивностей  $L_{g2}$ ,  $L_{d2}$  и  $L_{s2}$  выбирались из условий существования и максимальной ширины ОДЗ [6]. Вид полученных ОДЗ представлен на рис. 6, б, по ним с помощью программы LOCUS была синтезирована цепь ОС в виде последовательной RC-цепочки.

Далее выполнялся расчет межкаскадной цепи СЦ2 [9]. С этой целью при использовании программы REGION на плоскости  $\Gamma_{\gamma}^{(1)}$  получены односторонне нагруженные ОДЗ для первого каскада с подключенной входной цепью СЦ1 (рис. 7, требования взяты такими же, как и при построении ОДЗ на плоскости  $\Gamma_S^{(1)}$ ). Построены также полные ОДЗ на плоскости  $\Gamma_S^{(2)}$  для второго каскада с подключенной цепью параллельной ОС (рис. 8), здесь задавались следующие требования к его характеристикам:  $10 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 12 \text{ дБ}$  для частоты 8 ГГц,  $11 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 13 \text{ дБ}$  для частоты 10 ГГц и  $12 \text{ дБ} \leq G^{(2)} \leq 14 \text{ дБ}$  для частоты 12 ГГц; в полосе частот 8...12 ГГц  $m_1^{(2)} \leq 0,33$ ,  $m_2^{(2)} \leq 0,33$  и  $F^{(2)} \leq 2,5 \text{ дБ}$ ; вне этой полосы  $m_1^{(2)} \leq 1$ ,  $m_2^{(2)} \leq 1$ .

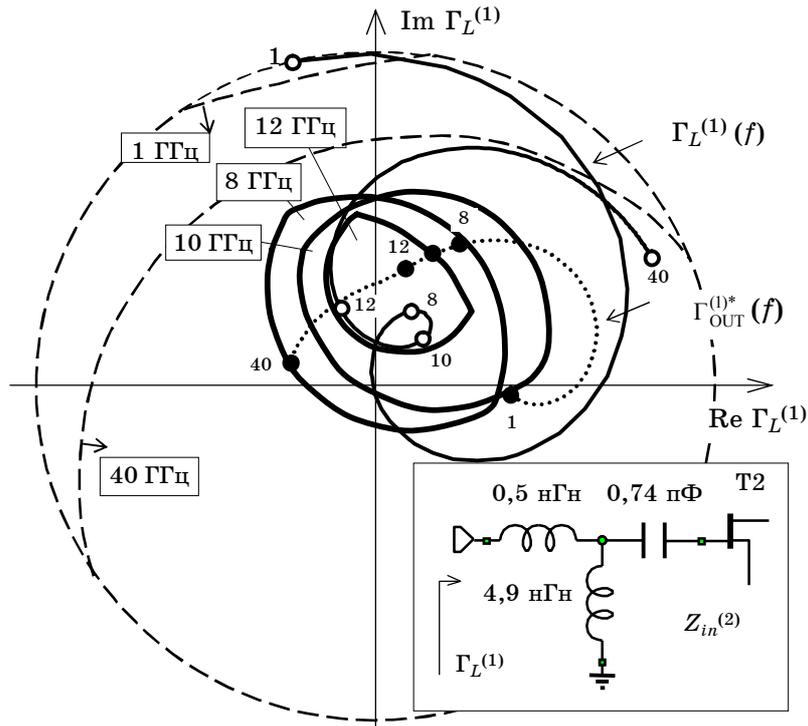


Рис. 7. Односторонне нагруженные ОДЗ, области устойчивости и годограф межкаскадной цепи СЦ2 на плоскости  $\Gamma_L^{(1)}$

Для обеспечения требуемых характеристик обоих каскадов годографы входного  $\Gamma_L^{(1)}(f)$  и выходного  $\Gamma_S^{(2)}(f)$  коэффициентов отражения реактивной межкаскадной цепи должны одновременно попасть в полученные ОДЗ на плоскостях  $\Gamma_L^{(1)}$  и  $\Gamma_S^{(2)}$  [9].

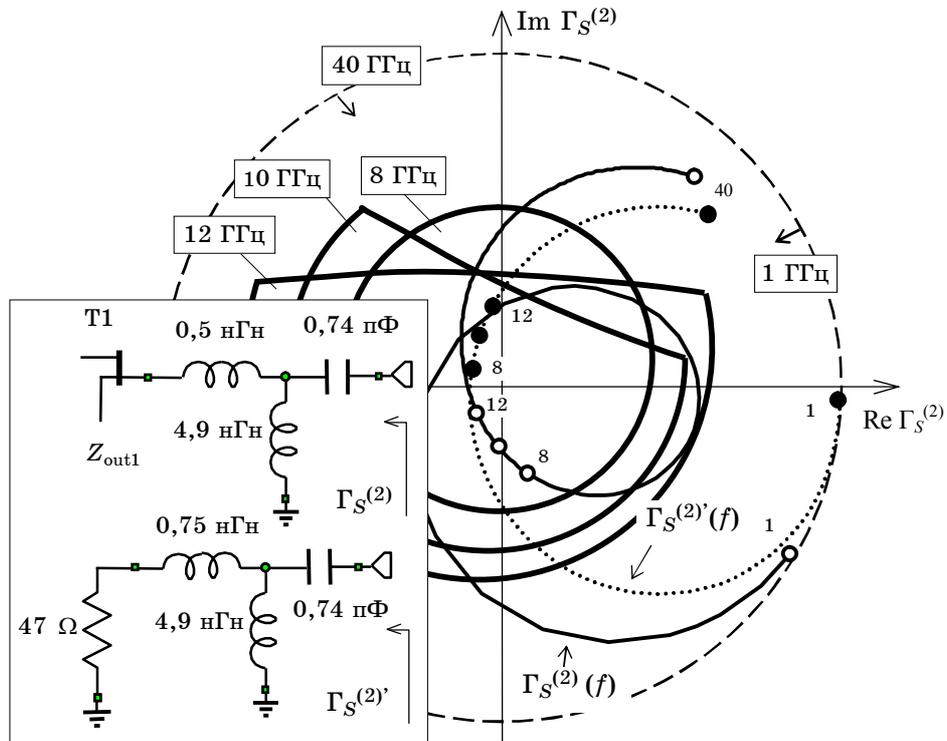


Рис. 8. Полные ОДЗ и годограф межкаскадной цепи СЦ2 на плоскости  $\Gamma_S^{(2)}$

Для облегчения решения последней задачи построен годограф коэффициента отражения, комплексно-сопряженного выходному коэффициенту отражения  $\Gamma_{\text{OUT}}^{(2)}$  транзистора Т1 (см. рис. 7). Видно, что точки годографа  $\Gamma_{\text{OUT}}^{(1)*}$  располагаются внутри соответствующих ОДЗ на плоскости  $\Gamma_L^{(1)}$ . На частотах 8...12 ГГц годограф  $\Gamma_{\text{OUT}}^{(1)*}$  аппроксимируется простой  $RL$ -цепочкой ( $R_{\text{OUT}} = 47$  Ом,  $L_{\text{OUT}} = 0,25$  нГн). Это позволяет выполнить синтез межкаскадной СЦ с помощью программы LOCUS по ОДЗ, построенным на плоскости  $\Gamma_S^{(2)}$  (см. рис. 8). При синтезе сопротивление источника сигнала для межкаскадной СЦ полагается равным  $R_{\text{OUT}} = 47$  Ом, структура цепи выбирается с учетом «поглощения» элемента  $L_{\text{OUT}}$ . На рис. 8 показан годограф  $\Gamma_S^{(2)}(f)$  полученной цепи.

Для проверки правильности расчета на рис. 7 и 8 также приведены годографы входного и выходного коэффициентов отражения синтезированной межкаскадной цепи СЦ2 при нагружении ее на реальные нагрузки – импедансы транзисторов Т1 и Т2. Как видно, годографы  $\Gamma_L^{(1)}(f)$  и  $\Gamma_S^{(2)}(f)$  попадают в требуемые ОДЗ.

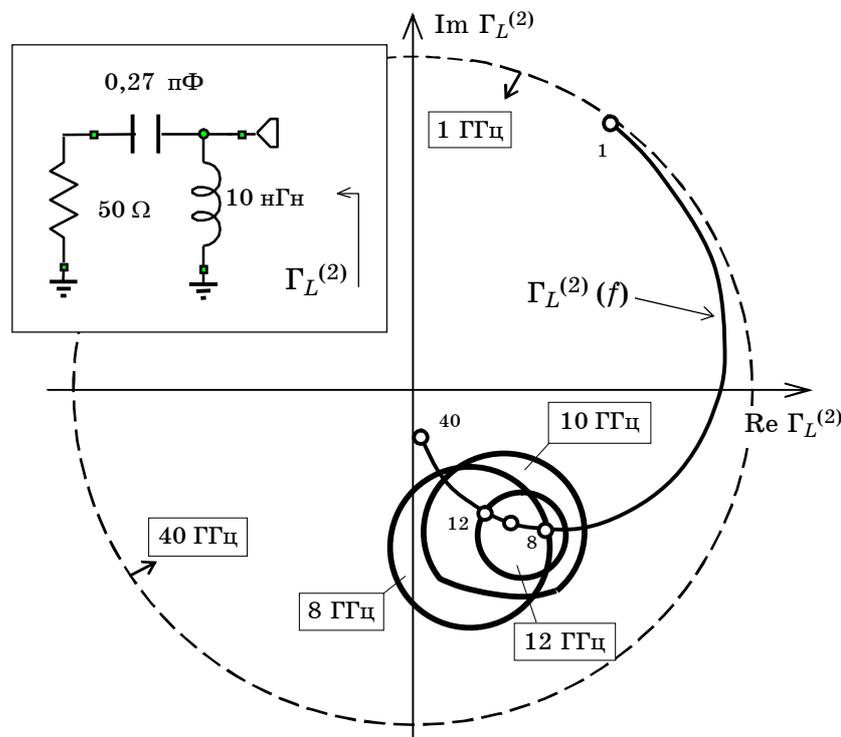


Рис. 9. Односторонне нагруженные ОДЗ и годограф выходной цепи СЦ3 на плоскости  $\Gamma_L^{(2)}$

Проектирование МШУ на идеальных элементах завершается синтезом выходной цепи СЦ3. С этой целью для уже спроектированного активного блока, представляющего собой соединение СЦ1–Т1–СЦ2–Т2, при использовании программы REGION построены односторонне нагруженные ОДЗ на плоскости  $\Gamma_L^{(2)}$  по комплексу требований к МШУ в целом в полосе частот 8...12 ГГц:  $20 \text{ дБ} \leq G \leq 22 \text{ дБ}$ ;  $m_1 \leq 0,33$ ;  $m_2 \leq 0,33$ ;  $F \leq 1,0 \text{ дБ}$ ; вне этой полосы  $m_1 \leq 1$ ,  $m_2 \leq 1$ . Вид полученных ОДЗ и годограф  $\Gamma_L^{(2)}(f)$  синтезированной выходной цепи показаны на рис. 9.

Результирующая схема двухкаскадного МШУ показана на рис. 10. В соответствии с результатами моделирования (рис. 11), усилитель на идеальных элементах в полосе частот 8...12 ГГц обеспечивает следующие характеристики: коэффициент усиления  $G = 20,5 \pm 0,5 \text{ дБ}$ ; коэффициент шума  $F \leq 0,7 \text{ дБ}$ ; коэффициенты отражения на входе  $|s_{11}| \leq -17 \text{ дБ}$  и выходе  $|s_{22}| \leq -9,0 \text{ дБ}$ ; коэффициент устойчивости  $k > 1$  во всем диапазоне частот.

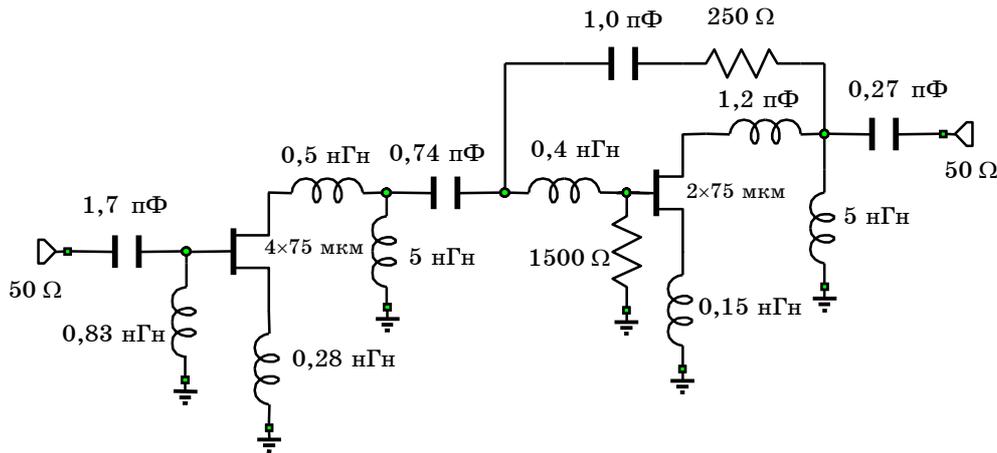


Рис. 10. Схема двухкаскадного МШУ на идеальных элементах

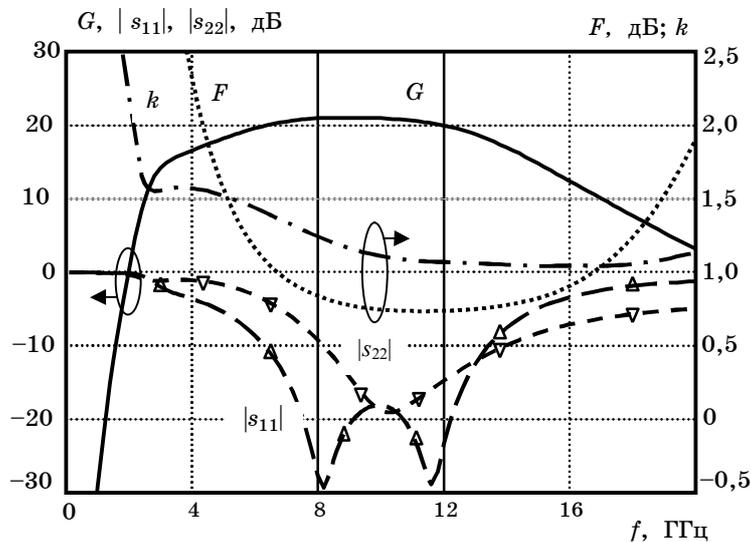


Рис. 11. Результаты моделирования двухкаскадного МШУ на идеальных элементах

Последний этап проектирования заключался в разработке топологии монолитного МШУ (рис. 12) и окончательной параметрической оптимизации всей схемы. Питание МШУ осуществляется от однополярного источника напряжения +3 В. В усилителе применены очень простые цепи смещения (заземление затворов транзисторов  $T1$  и  $T2$  соответственно через шунтирующую индуктивность и резистор). Оба транзистора работают при нулевом напряжении на затворе ( $V_{gs} = 0$  В), это позволило исключить обычно используемые для реализации смещения резисторы или транзисторы в двухполюсном включении в цепи истоков  $T1$  и  $T2$ . Такое решение, помимо упрощения схемы, дает возможность уменьшить коэффициент шума.

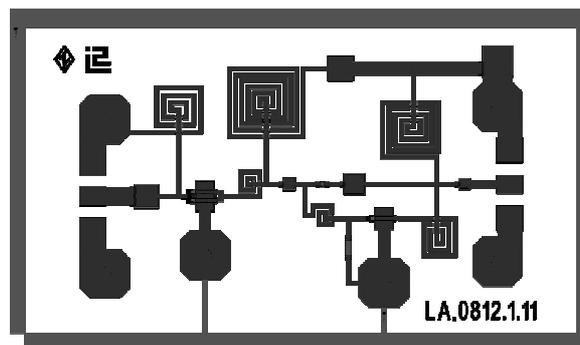


Рис. 12. Топология двухкаскадного монолитного МШУ (размер чипа 2,4×1,4 мм)

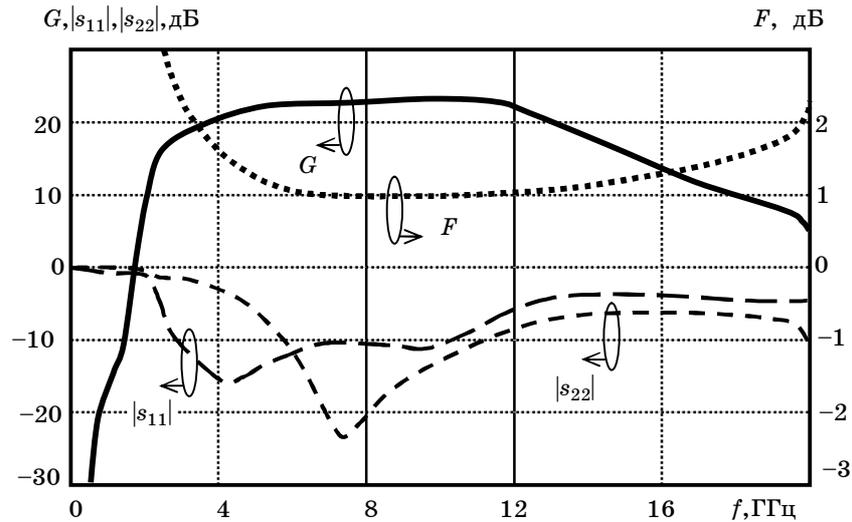


Рис. 13. Результаты моделирования двухкаскадного монолитного МШУ

Моделирование с использованием разработанной в ЛИКС ТУСУРА библиотеки моделей монолитных элементов для технологии ИСВЧПЭ РАН [10] показало, что двухкаскадный МШУ в полосе частот 8...12 ГГц имеет следующие параметры: коэффициент усиления  $G = 22 \pm 0,5$  дБ; коэффициент шума  $F \leq 1,1$  дБ; коэффициенты отражения на входе  $|s_{11}| \leq -6$  дБ и выходе  $|s_{22}| \leq -8$  дБ; коэффициент устойчивости  $k > 1$  во всем диапазоне частот (рис. 13).

Проектирование трехкаскадного МШУ. Аналогичным образом был разработан трехкаскадный монолитный МШУ, его топология изображена на рис. 14. В соответствии с результатами моделирования (рис. 15), трехкаскадный усилитель в полосе частот 6...12 ГГц имеет следующие параметры:  $G = 30 \pm 0,5$  дБ;  $F \leq 1,4$  дБ ( $F \leq 1,1$  дБ в диапазоне 8–12 ГГц);  $|s_{11}| \leq -13$  дБ;  $|s_{22}| \leq -16$  дБ;  $k > 1$  во всем диапазоне частот.

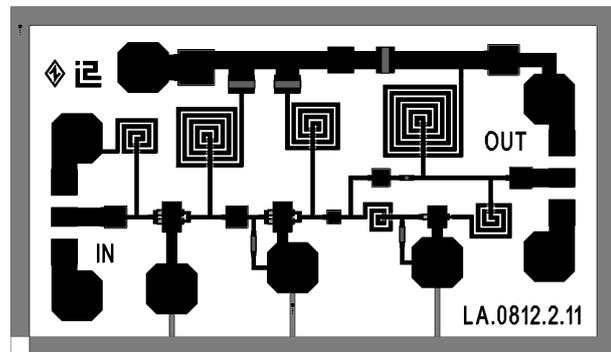


Рис. 14. Топология трехкаскадного монолитного МШУ (размер чипа 2,4×1,4 мм)

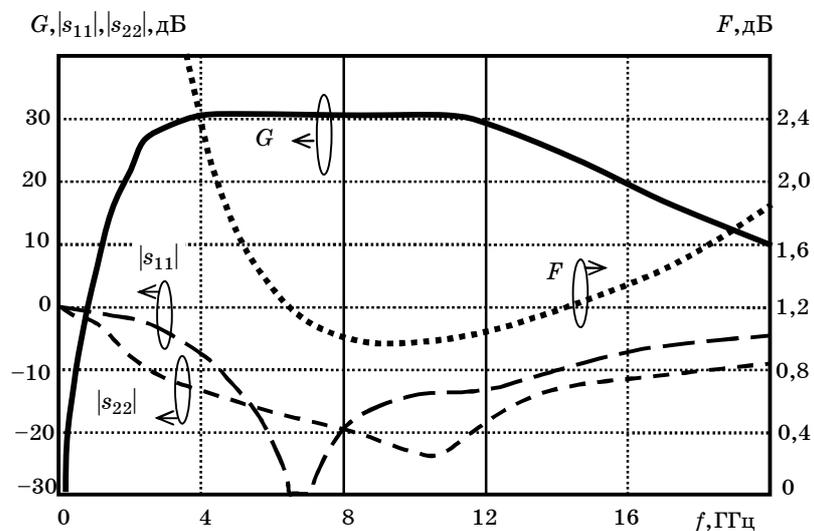
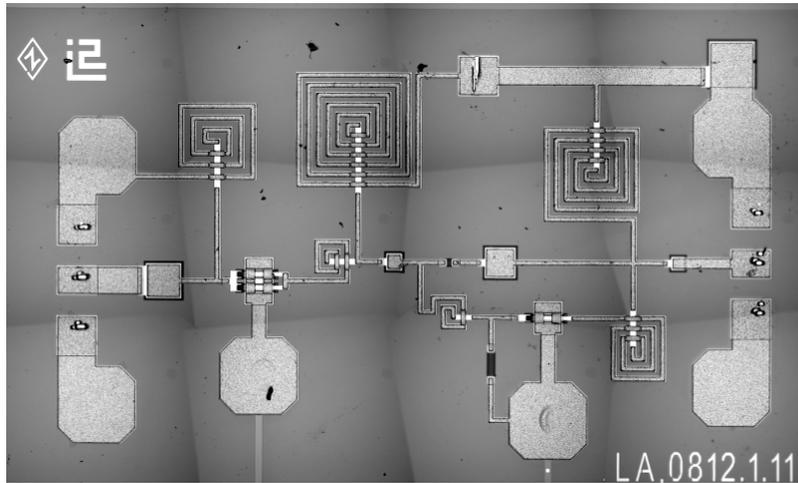


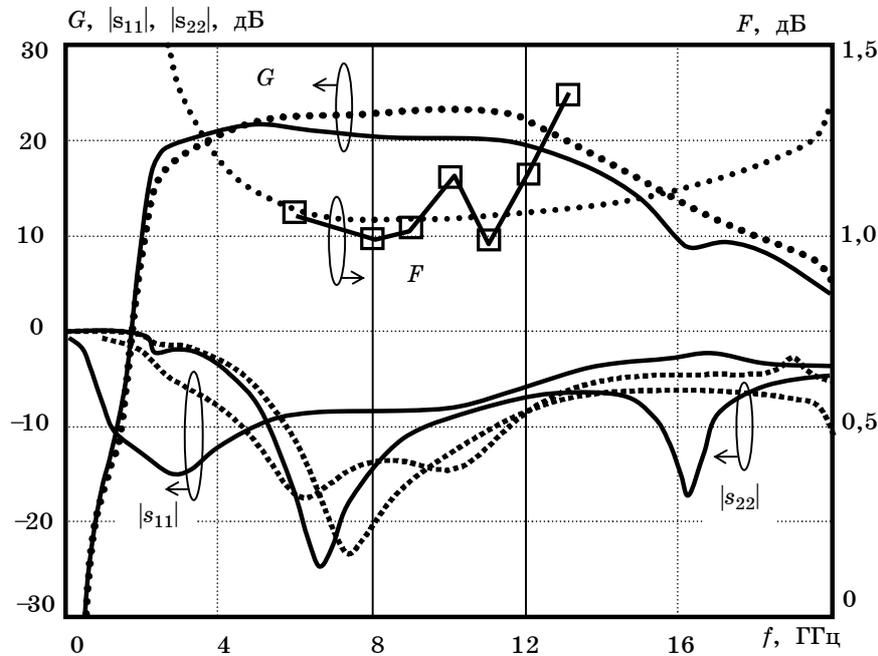
Рис. 15. Результаты моделирования трехкаскадного монолитного МШУ

### Экспериментальное исследование усилителей

Разработанные двух- и трехкаскадный монолитные МШУ были изготовлены в ИСВЧПЭ РАН на основе 0,15 мкм GaAs рНЕМТ-технологии. Фотографии МИС усилителей приведены соответственно на рис. 16,а и 17,а.



а

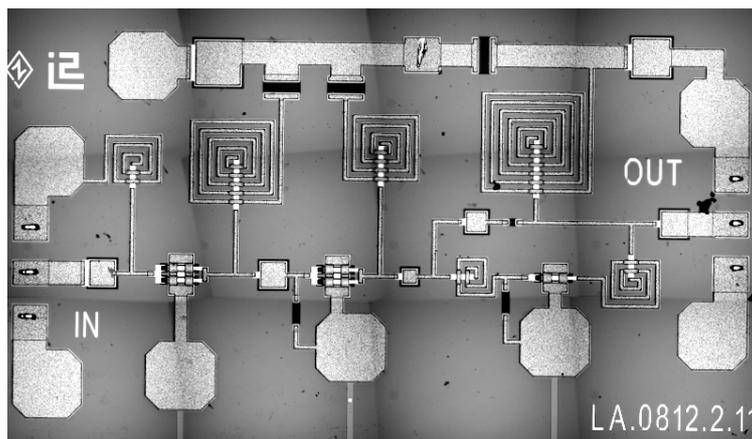


б

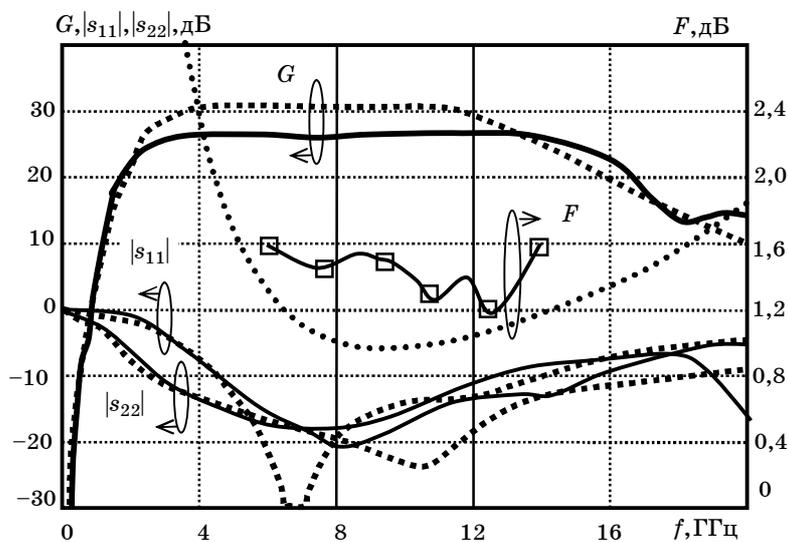
Рис. 16. Фотография (а) и характеристики (б) МИС двухкаскадного МШУ (моделирование – пунктирная линия, измерения – сплошная линия)

До разделения на кристаллы  $S$ -параметры усилителей измерялись непосредственно на пластине с использованием зондовой установки. Типичные характеристики двух- и трехкаскадных МШУ приведены на рис. 16,б и 17,б. Всего было исследовано более 150 из 250 изготовленных кристаллов. Годными считались усилители, коэффициент усиления которых не отличался от средней величины более чем на 2 дБ. В результате исследований установлено, что параметры усилителей имеют очень небольшой разброс по пластине, а выход годных кристаллов равен 70%, что свидетельствует о высоком качестве разработанной технологии.

После разделения на кристаллы годные МИС монтировались в СВЧ-модуль и производились дополнительные измерения характеристик усиления и шума. Типичные частотные зависимости коэффициента шума двух- и трехкаскадных МШУ при стендовых измерениях показаны на рис. 16,б и 17,б.



а



б

Рис. 17. Фотография (а) и характеристики (б) МИС трехкаскадного МШУ (моделирование – пунктирная линия, измерения – сплошная линия)

Сводные характеристики разработанных МИС двух- и трехкаскадного МШУ X-диапазона приведены в табл. 1 и 2, соответственно. Здесь же для сравнения даны параметры лучших зарубежных МИС МШУ, серийно выпускаемых по аналогичным технологиям фирмами Triquint и Hittite (США). Как видно, по основному комплексу параметров, включая коэффициент шума, созданные нами МИС МШУ не уступают лучшим зарубежным разработкам. Следует отметить, что при некотором ухудшении характеристик усилители могут использоваться в полосе частот от 3 до 14 ГГц.

Таблица 1

Сводные характеристики МИС двухкаскадного МШУ X-диапазона в сравнении с зарубежными аналогами

Тип	2-каскадный LA.0812.1.11 (ИСВЧПЭ)	TGA2511 (Triquint, США)	HMC 564 (Hittite, США)
Технология	0,15 мкм рНЕМТ	0,15 мкм рНЕМТ	0,15 мкм рНЕМТ
$\Delta f$	6...12 ГГц	6...14 ГГц	7...13,5 ГГц
$G$	20±1 дБ	18±1 дБ	17±1 дБ
$NF$	<1,4 дБ ( $\Delta f=8...12$ ГГц)	<1,5 дБ ( $\Delta f=8...12$ ГГц)	<1,8 дБ ( $\Delta f=8...12$ ГГц)
$m_1, m_2$	-7,5 дБ; -10 дБ	-15 дБ; -13 дБ	-10 дБ; -12 дБ;
$V_d, I_d$	3 В; 62 мА	5В; 80 мА	3 В; 51 мА
$P_{out}$ 1дБ	10 дБм	4 дБм	12 дБм
Размеры	2,4×1,4 мм	2,05×1,2 мм	1,96×0,98 мм

Таблица 2

Сводные характеристики МИС трехкаскадного МШУ X-диапазона в сравнении с зарубежными аналогами

Тип	3-каскадный LA.0812.2.11 (ИСВЧПЭ)	TGA2512 (Tiquint, США)	НМС 565 (Hittite, США)
Технология	0,15 мкм рНЕМТ	0,15 мкм рНЕМТ	0,15 мкм рНЕМТ
$\Delta f$	6...12 ГГц	6...14 ГГц	6...18 ГГц
$G$	28±1 дБ	25±1 дБ	22,5±2 дБ
$NF$	<1,6 дБ ( $\Delta f=8...12$ ГГц)	<1,6 дБ ( $\Delta f=8...12$ ГГц)	<2,3 дБ ( $\Delta f=8...12$ ГГц)
$m_1, m_2$	-10 дБ; -12 дБ	-13 дБ; -15 дБ	-10 дБ; -11 дБ
$Vd, Id$	5 В, 92 мА	5В, 90 мА	3 В, 53 мА
$P_{out}$ дБм	10 дБм	6 дБм	11 дБм
Размеры	2,4×1,4 мм	2,05×1,2 мм	2,53×0,98 мм

### 5. Заключение

В результате выполненных работ *впервые в России* разработан комплект 0,15 мкм GaAs рНЕМТ МИС МШУ X-диапазона с параметрами на уровне лучших зарубежных аналогов. Применение процедур и программ визуального проектирования позволило выполнить разработку монолитных МШУ в короткие сроки, при этом весь процесс разработки, изготовления и измерений занял один производственный цикл. Высокий выход годных кристаллов МШУ с пластины позволяет судить о промышленной пригодности разработанного технологического маршрута.

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 ТУСУРа. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 49–55.
2. 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.
3. Бабак Л.И. Программы «визуального» проектирования транзисторных СВЧ усилителей / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, А.Ю. Поляков и др. // Сб. трудов 15-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 425–426.
4. Бабак Л.И. Программа «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей СВЧ-устройств / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // Сб. трудов 15-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 423–424.
5. Babak L.I. Interactive «visual» design of matching and compensation networks for microwave active circuits / L.I. Babak, M.V. Cherkashin. // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. Phoenix, AZ, May. – 2001. – Vol. 3. – P. 2095–2098.
6. Design of 2-10 GHz feedback MMIC LNA using «visual» technique / M.V. Cherkashin, D. Eyllier, L.I. Babak et al. // Proc. 35<sup>th</sup> Europ. Microwave Conf. – Paris, France, 2005. – P. 1153–1156.
7. Babak L.I. A new «region» technique for designing microwave transistor low-noise amplifiers with lossless equalizers / L.I. Babak, M.V. Cherkashin, A.Yu. Polyakov. // Proc. 38<sup>th</sup> Europ. Microwave Conf. Proc. – Amsterdam, Netherlands, 2008. – P. 1402–1405.
8. Babak L.I. Decomposition synthesis approach to design of RF and microwave active circuits // IEEE MTT-S Int. Microwave Sym. Dig. Phoenix, AZ, May. – 2001. – Vol. 2. – P. 1167–1170.
9. Бабак Л.И. Методика проектирования многокаскадных транзисторных усилителей с реактивными согласующими цепями / Л.И. Бабак, Ф.И. Шеерман // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». – Томск: В-Спектр, 2007. – Ч. 2. – С. 160–164.

10. 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.

**Мокеров Владимир Григорьевич**

Директор Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва  
Тел.: +7 (499) 123-44-64

**Бабак Леонид Иванович**

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

**Федоров Юрий Владимирович**

Зав. лаб. ИСВЧПЭ РАН, г. Москва  
Тел.: +7 (499) 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

**Кузнецов Алексей Львович**

Ст.научн.сотрудник ИСВЧПЭ РАН, г. Москва  
Тел.: +7 (495) 123-74-66

**Гнатюк Дмитрий Леонидович**

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

---

Mokerov V.G., Babak L.I., Fedorov Yu.V., Cherkashin M.V., Sheyerman F.I.,  
Bugaev A.S., Kuznetsov A.L., Gnatyuk D.L.

**Development of a set of X-band MMIC low-noise amplifiers based on 0.15  $\mu\text{m}$  GaAs pHEMT technology**

The results of designing and fabrication of the Russian first set of 2- and 3-stage X-band MMIC low-noise amplifiers (LNAs), which are based on 0,15  $\mu\text{m}$  pHEMTGaAs technology, are presented. The amplifiers cover the frequency range from 6 GHz to 12 GHz with the gain of  $20\pm 1$  ( $28\pm 1$ ) dB and have the noise figure of 1.4 (1.6) dB, respectively. The use of interactive “visual” techniques and corresponding software tools allows to implement the fast and high-performance LNA design.

**Keywords:** MMIC, technology, pHEMT, low-noise amplifier, X-band, automatized synthesis, visual design.