УДК: 621.375.4

М.В. Черкашин

Проектирование монолитного СВЧ-усилителя миллиметрового диапазона волн

Представлены результаты разработки монолитной интегральной схемы (МИС) СВЧ-усилителя миллиметрового диапазона волн на основе гетероструктурной 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии PL1510 фирмы Win Semiconductors (Тайвань). Проектирование усилителя было выполнено с помощью методик и программ, основанных на интерактивном визуальном синтезе СВЧ-устройств и цепей.

Ключевые слова: СВЧ-усилитель, монолитные интегральные схемы, W-диапазон, pHEMT-технология.

Повышение частотного диапазона СВЧ-устройств имеет массу преимуществ, так как позволяет уменьшить мощность, излучаемую передатчиком, повысить плотность канала передачи информации, снизить энергетические и массогабаритные параметры системы в целом и др. Однако переход на новый частотный диапазон, требует разработки новых компонентов приемопередающего тракта.

В статье представлены результаты проектирования линейного малошумящего усилителя (МШУ) для частотного диапазона 70–85 ГГЦ (W-band – по зарубежной классификации). Усилитель выполнен в виде монолитной интегральной микросхемы (МИС) на основе гетероструктурной GaAs-pHEMT-технологии PL1510 фирмы Win Semiconductors (Тайвань). Длина затвора транзисторов для этой технологии равна 0,15 мкм [1].

Проектирование МШУ. К МШУ были предъявлены следующие требования: полоса рабочих частот 70–85 ГГц, коэффициент усиления G не менее 10±1 дБ, коэффициент шума NF не более 5 дБ, входной $m_1 = |s_{11}|$ и выходной $m_2 = |s_{22}|$ коэффициенты отражения не более –10 дБ (КСВН не более 2), напряжение питания 4–6 В, потребляемый ток I_{DS} не более 100 мА, выходная мощность P_{1dBm} в линейном режиме не менее 10 дБм. Усилитель должен быть безусловно устойчивым во всем диапазоне частот от 0 до 100 ГГц ($k > 1$).

В качестве активного элемента был выбран транзистор с общей шириной затвора 2×20 мкм, который на частоте 75 ГГц имеет минимальный коэффициент шума около $F_{min} \approx 3{,}2$ дБ и соответствующий коэффициент усиления по мощности $G_{ass} \approx 3{,}3$ дБ ($V_G = -0{,}3$ В, $V_{DS} = 3$ В, $I_{DS} = 7$ мА). Таким образом, для достижения заданных требований к усилителю нам потребуется 3–4 каскада усиления.

Проектирование усилителя было выполнено с применением методики и комплекса программ визуального проектирования Microwave Look [2, 4], разработанных в Лаборатории интеллектуальных компьютерных систем ТУСУРа (г. Томск). Программный комплекс состоит из программ AMP-CF, REGION и LOCUS [3]. В них реализованы интерактивные процедуры «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей, а также пассивных корректирующих (КЦ) и согласующих (СЦ) цепей. При этом процесс проектирования усилителей с КЦ и СЦ содержит два основных этапа [2, 5]: 1) построение на заданных частотах областей допустимых значений (ОДЗ) иммитанса КЦ или коэффициента отражения СЦ, исходя из требований к характеристикам усилителя; 2) синтез (определение структуры и значений элементов) КЦ и СЦ по полученным ОДЗ.

Программы AMP и REGION предназначены для построения ОДЗ на комплексной плоскости иммитанса или коэффициента отражения КЦ и СЦ. Программа LOCUS позволяет выполнить интерактивный синтез двухполюсных КЦ и реактивных СЦ умеренной сложности (от 2 до 5 элементов) по заданным ОДЗ. Применение визуального подхода разрешает выполнить расчет многокаскадного СВЧ-усилителя по комплексу требований в полосе частот с учетом взаимного влияния каскадов друг на друга.

Подробное описание процесса визуального проектирования на примере расчета двухкаскадного усилителя X-диапазона приведено в [5].

Было разработано несколько вариантов усилителя. МШУ1 состоит из трех каскадов. Его структурная схема приведена на рис. 1. Первый каскад настроен на минимум коэффициента шума, применение индуктивной ОС в цепи истока ($L_S^{(1)}$) позволяет сблизить условия согласования по шуму и

сигналу. Для выравнивания коэффициента усиления и обеспечения согласования входа и выхода транзисторов с трактом передачи сигнала используются реактивные согласующе-выравнивающие цепи СЦ1-СЦ4. Кроме того, входная СЦ1 и выходная СЦ4 цепи обеспечивают согласование входа и выхода усилителя с трактом передачи сигнала. Индуктивности в схеме усилителя выполнены в виде отрезков микрополосковых линий.

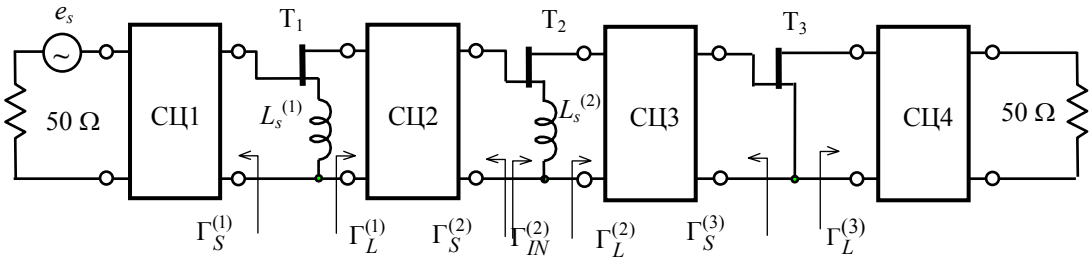


Рис. 1. Структурная схема МШУ1

Для демонстрации визуальной методики синтеза рассмотрим процесс проектирования первого каскада МШУ1. Этот каскад должен обеспечить компромисс между согласованием со стороны входа и достаточно малым коэффициентом шума. При этом со стороны выхода для первого транзистора желательно обеспечить режим сопряженного согласования за счет первой межкаскадной СЦ2.

Назначим следующие требования для первого каскада: 3,5 дБ $\le G^{(1)} \le$ 4,5 дБ, $NF^{(1)} \le$ 3,5 дБ, $|s_{11}^{(1)}| = m_1^{(1)} \le -10$ дБ, $|s_{22}^{(1)}| = m_2^{(1)} \le -10$ дБ для полосы частот Δf = 70–85 ГГц. С помощью программы REGION были получены области допустимых значений (ОДЗ) на плоскостях входного $\Gamma_S^{(1)}$ и выходного $\Gamma_L^{(1)}$ коэффициентов отражения для первого транзистора Т1 [5]. При этом можно варьировать величину индуктивности обратной связи $L_S^{(1)}$ для получения максимально «широких» ОДЗ, что дает нам возможность в дальнейшем синтезировать цепи минимальной сложности.

Для того чтобы первый каскад удовлетворял заданным требованиям, необходимо выполнить расчет СЦ1 и СЦ2 таким образом, чтобы они трансформировали нагрузки Z_0 = 50 Ом со стороны входа и $\Gamma_{IN}^{(1)}$ со стороны выхода транзистора Т1 в значения, удовлетворяющие полученным ОДЗ, т.е. точки годографов $\Gamma_S^{(1)}(f)$ и $\Gamma_L^{(1)}(f)$ для выбранных частот должны лежать внутри соответствующих ОДЗ.

Также были получены круговые области устойчивости на частотах 10 и 50 ГГц вне рабочего диапазона (они изображены на рис. 2 штриховыми линиями). По найденным ОДЗ и областям устойчивости с помощью программы LOCUS была синтезирована входная СЦ1 (рис. 2, *а*).

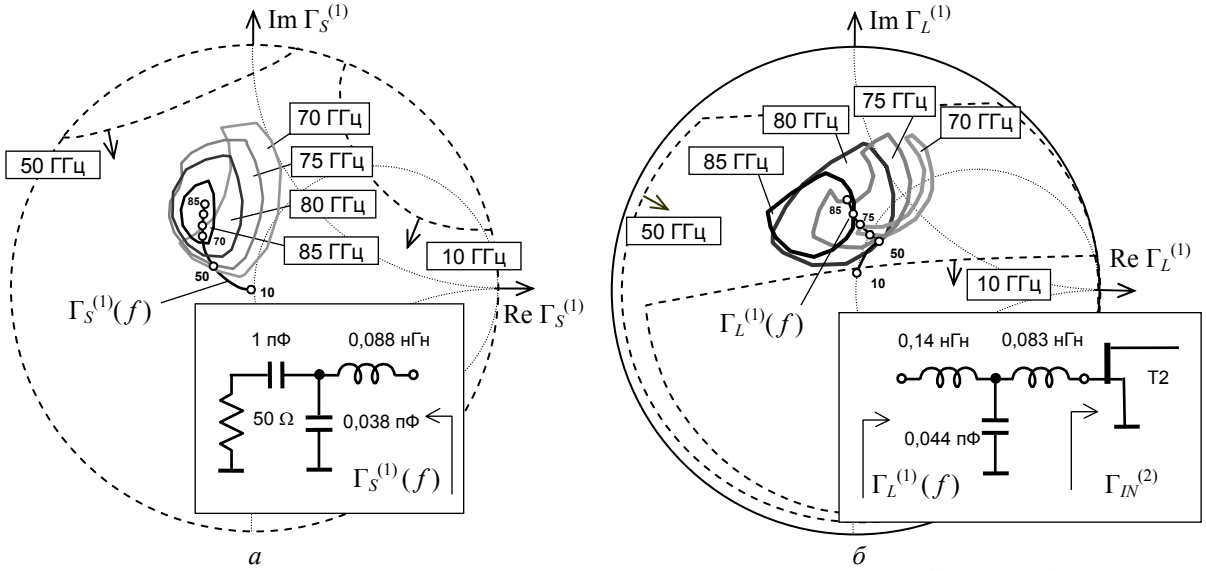
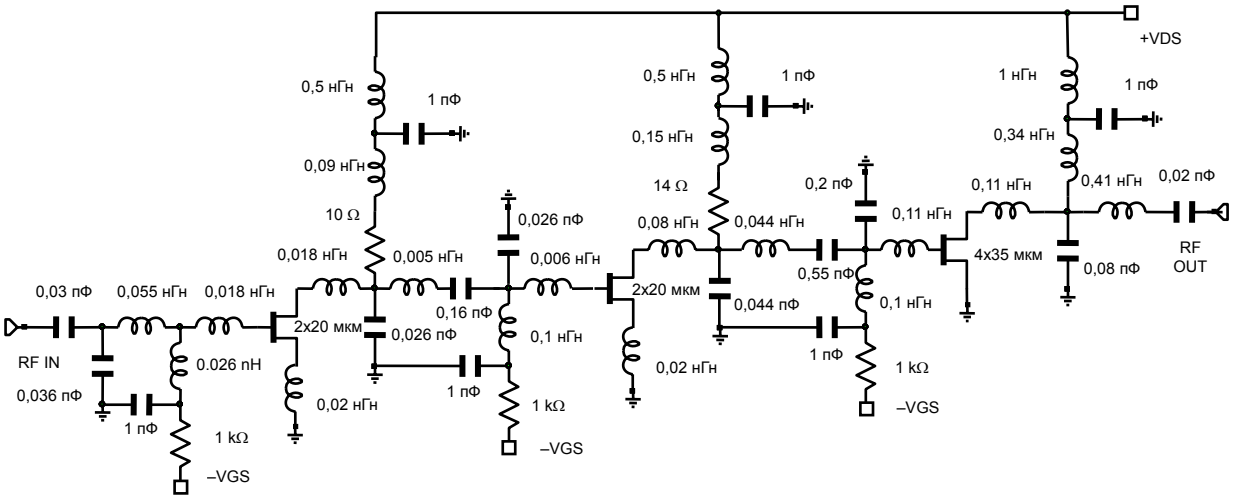


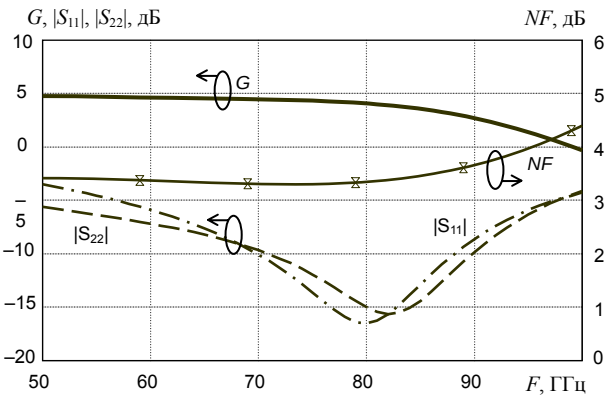
Рис. 2. ОДЗ и годографы коэффициента отражения СЦ на плоскости $\Gamma_S^{(1)}$ (*а*) и $\Gamma_L^{(1)}$ (*б*).
Требования к каскаду для получения ОДЗ для частот 70–85 ГГц: 3,5 дБ $\le G^{(1)} \le$ 4,5 дБ, $NF^{(1)} \le$ 3,5 дБ, $m_1^{(1)} \le -10$ дБ, $m_2^{(1)} \le -10$ дБ; для частот 10 и 50 ГГЦ: $m_1^{(1)} < 1{,}0$, $m_2^{(1)} < 1{,}0$

Далее были построены ОДЗ на плоскости $\Gamma_L^{(1)}$ для первого каскада (при подключенной входной СЦ1) и ОДЗ на плоскости $\Gamma_S^{(2)}$ для второго каскада (при условии сопряженного согласования на его выходе). Межкаскадная СЦ2 синтезируется таким образом, чтобы годограф ее входного коэффициента отражения $\Gamma_L^{(1)}(f)$ попал в ОДЗ на плоскости $\Gamma_L^{(1)}$ и одновременно годограф выходного коэффициента отражения $\Gamma_S^{(2)}(f)$ попал в ОДЗ на плоскости $\Gamma_S^{(2)}$. Процедура синтеза межкаскадной цепи подробно описана в [5]. Для примера на рис. 2, *б* представлены «частные» ОДЗ (с учетом того, что СЦ1 подключена к Т1) и годограф СЦ2 на плоскости $\Gamma_L^{(1)}$ для первого каскада. Характеристики первого каскада показаны на рис. 3, *б*.

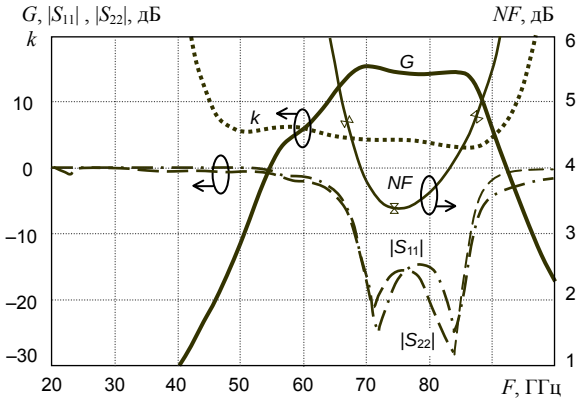
Аналогичным образом можно выполнить расчет второй межкаскадной СЦ3 и выходной СЦ4. На следующем шаге в схему усилителя на идеальных элементах были добавлены цепи смещения по постоянному току и блокировочные емкости. Кроме того, для повышения устойчивости в области НЧ, в состав межкаскадных СЦ были включены резисторы с номинальным значением 10–15 Ом. Схема МШУ1, полученная после параметрической оптимизации, показана на рис. 3, *а*, а его частотные характеристики – на рис. 3, *в*.



а



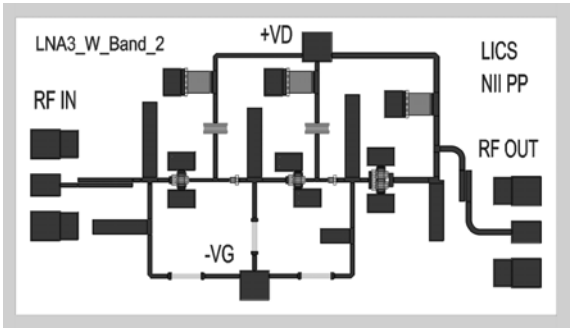
б



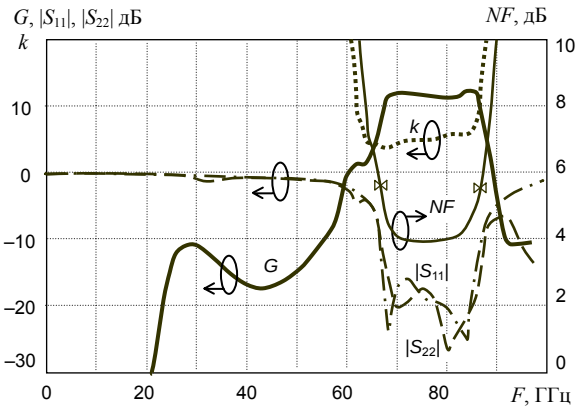
в

Рис. 3. Схема (*а*) и результаты моделирования первого каскада (*б*) и трехкаскадного МШУ1 (*в*) на идеальных элементах

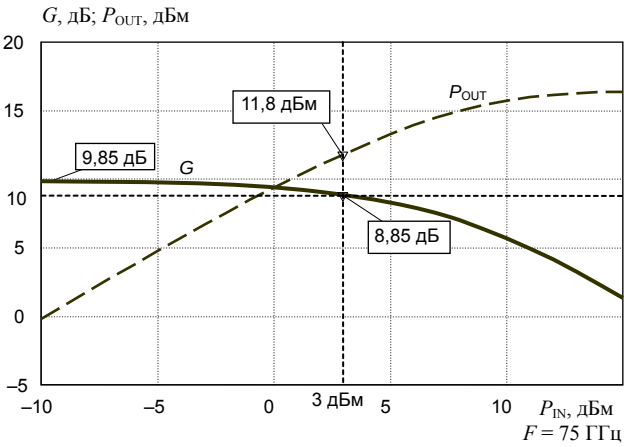
На следующем этапе проектирования была разработана топология кристалла МИС трехкаскадного усилителя и выполнена его параметрическая оптимизация. При этом индуктивности были заменены на отрезки линий передачи, а емкости, соединенные с «землей», – разомкнутыми шлейфами. Топология МИС трехкаскадного МШУ1 показана на рис. 4, *а*. Размер кристалла МИС 1,92×1,1 мм. Характеристики монолитного МШУ1, полученные в результате моделирования в среде AWR MW Office, показаны на рис. 4, *б* и *в*, а также сведены в таблицу. При этом для расчета СЦ использовался электромагнитный анализ на основе процедуры экстракции топологии AXIEM, входящий в состав AWR MW Office.



а



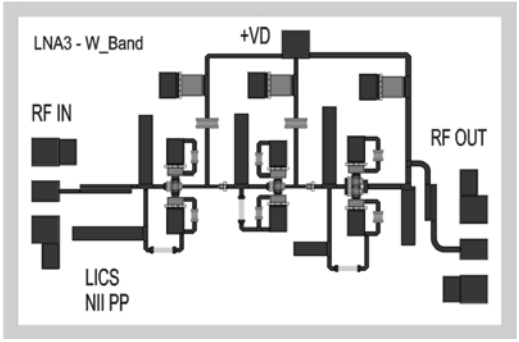
б



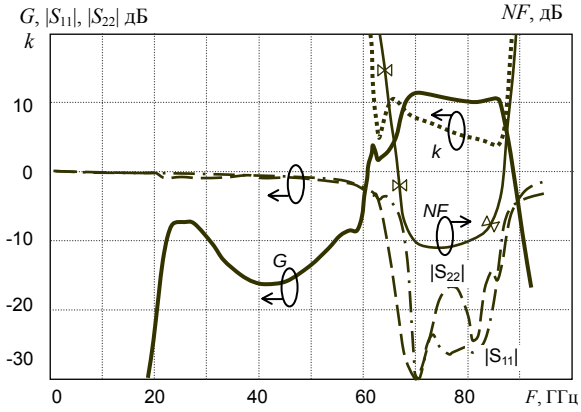
в

Рис. 4. Топология МИС (*а*) и результаты моделирования трехкаскадного монолитного МШУ1: малосигнальные параметры (*а*); выходная мощность на частоте 75 ГГц (*в*)

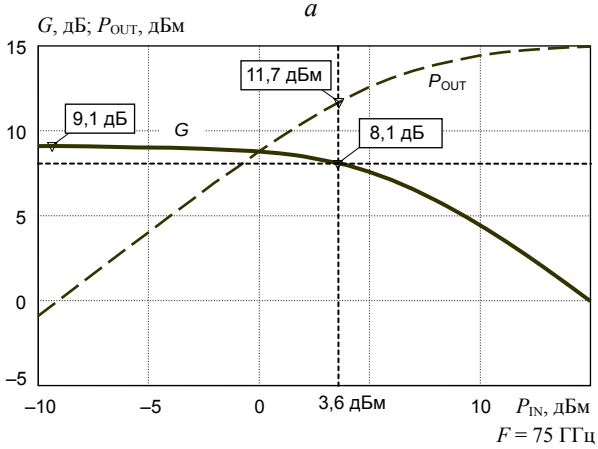
Разработанный трехкаскадный МШУ1 был модифицирован. Для того чтобы избавиться от двухполярного питания, в цепи истоков транзисторов были добавлены цепи автосмещения, состоящие из параллельных *RC*-цепочек. Топология МИС трехкаскадного МШУ2 с автосмещением показана на рис. 5, *а*, а его характеристики – на рис. 5, *б* и *в*, а также в таблице.



а

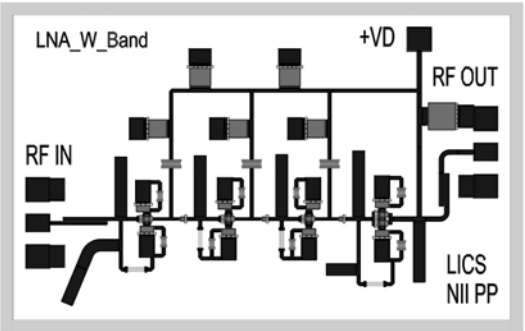


б



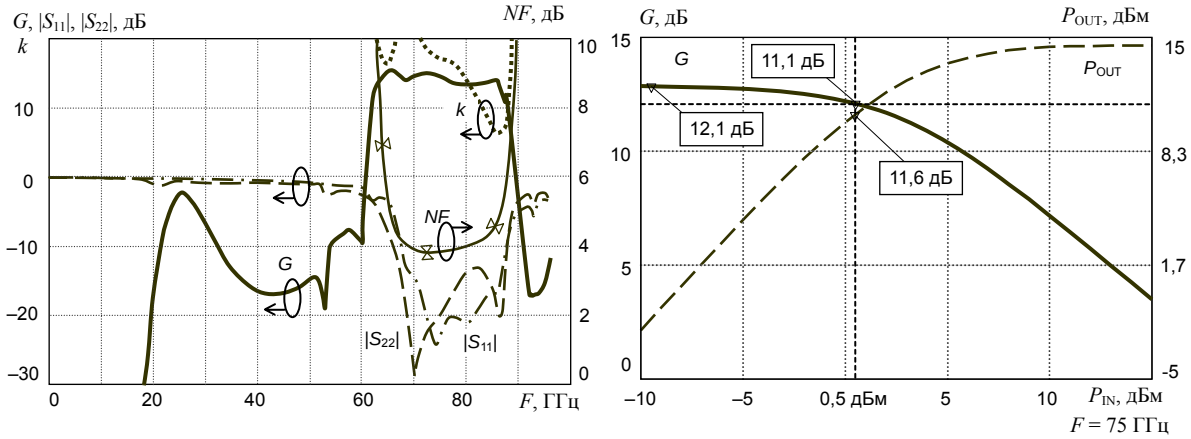
в

Рис. 5. Топология МИС (*а*) и результаты моделирования трехкаскадного МШУ2 с цепями автосмещения: малосигнальные параметры (*б*); выходная мощность на частоте 75 ГГц (*в*)



а

Кроме того, для увеличения общего коэффициента усиления был реализован четырехкаскадный МШУ. При этом в схему МШУ2 был добавлен еще один промежуточный каскад, аналогичный второму каскаду МШУ2 (см. рис. 5, *а*). При этом общее усиление усилителя увеличилось примерно на 3 дБ. Топология МИС четырехкаскадного МШУ3 показана на рис. 6, *а*, а его характеристики – на рис. 6, *б* и *в* и в таблице.



б *в*

Рис. 6. Топология МИС (*а*) и результаты моделирования четырехкаскадного МШУ3: малосигнальные параметры (*б*); выходная мощность на частоте 75 ГГц (*в*)

Параметры МИС усилителей

Усилитель	Полоса частот, ГГц	$G \pm \Delta G$, дБ	$\lvert S_{11}\rvert$, дБ	$\lvert S_{22}\rvert$, дБ	NF, дБ	P_{out1dB}, дБм	V_{DS}, В I_{DS}, мА	Размер, мм
МШУ1	68–86	11±1,0	–12	–12	5	11@75 GHz	3×27	1,92×1,1
МШУ2	68–86	10±1,0	–12	–12	5	11@75 GHz	3×30	1,83×1,2
МШУ3	68–86	12±1,0	–12	–12	5	11@75 GHz	3×42	2,13×1,35

Следует отметить: 1) Усиление монолитного МШУ, по сравнению с усилителем на идеальных элементах, уменьшилось на 3–4 дБ, а коэффициент шума увеличился почти на 1 дБ. Это объясняется потерями в реактивных элементах МИС и главным образом большими паразитными параметрами и потерями в заземляющих отверстиях (VIA Holes).

2) Представленная технология PL1510 (0,15 мкм GaAs pHEMT) практически исчерпала свои потенциальные возможности по дальнейшему увеличению частотного диапазона и снижению коэффициента шума. Это видно по тому, что в составе МШУ мы вынуждены использовать транзисторы с малой общей шириной затвора, вследствие чего усиление на каскад не превышает 2–3 дБ. Возможно, некоторый выигрыш в приросте усиления на каскад даст переход на копланарную реализацию топологии МИС, так как в этом случае упрощается реализация «земли» (нет необходимости делать заземляющие отверстия). Большими потенциальными возможностями, с точки зрения построения малошумящих усилителей, по-видимому, обладают 0,07–0,12 мкм GaAs-mHEMT-технологии и HEMT на основе InP. Это подтверждается большим числом публикаций в зарубежной литературе по разработке устройств на базе этих технологий.

Заключение. В ходе работы над проектом были разработаны три МИС линейного усилителя диапазона частот 70–86 ГГц на базе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии PL1510 Win Semiconductors. Представленные МШУ могут найти применение в составе приемопередающих трактов радиосистем миллиметрового диапазона частот.

Данная работа была поддержана грантами в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (направления «Микроэлектроника», «Нанотехнологии» и «Электронная компонентная база», мероприятия 1.1, 1.2.1, 1.2.2, 1.3.1 и 1.3.2).

Литература

1. HEMT-Technologies. Сайт фирмы Win Semiconductors [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.winfoundry.com/en_US/support.aspx, свободный, (дата обращения: 10.09.2011).
2. Бабак Л.И. «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ-устройств. Ч. 1: Описание процедуры проектирования / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, Д.А. Зайцев // Доклады ТУСУРа. – 2006. – № 6 (14). – С. 11–14.
3. Бабак Л.И. Комплекс программ «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей и пассивных цепей / Л.И. Бабак, Д.А. Зайцев., К.С. Бодунов, Е.В. Казанцев // Сб. докладов междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». – Томск: В-Спектр, 2007. – Ч. 2. – С. 113–115.
4. Бабак Л.И. Программы «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей / Л.И. Бабак, А.Ю. Поляков, К.С. Бодунов, А.В. Дягилев // Сб. трудов 15-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 425–426.
5. Babak L.I. Design of Multistage Low-Noise Amplifiers Using «Visual» CAD Tools / L.I. Babak, M.V. Cherkashin, F.I. Sheyerman, Yu.V. Fedorov // Microwave Symp. Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S Int. – Baltimore, MD. – 2011. – P. 1–4.

Черкашин Михаил Владимирович
Канд. техн. наук, доцент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУР
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: mcher@kcup.tusur.ru

Cherkashin M.V.
Design of W-band MMIC Amplifier

Design of W-band MMIC low-noise amplifier (LNA) based on 0.15 um GaAs pHEMT PL1510 process from Win Semiconductors (Taiwan) are presented. Software tools AMP, REGION and LOCUS based on interactive visual design synthesis methods were used for amplifier designing. MMIC LNA provides follow parameters: frequency range: $\Delta f = 68–76$ GHz; power gain: $G = 10\pm1$ dB, input and output return losses: $|s_{11}| = |s_{22}| \leq -12$ dB; noise figure: $NF \leq 5$ dB; linear output power: $P_{\text{out1dB}} \geq 11$ dBm.
Keywords: GaAs pHEMT MMIC, W-band low-noise amplifier, visual design.