

СВЧ монолитная интегральная схема усилителя мощности на основе кремниевой технологии с выходной мощностью 1 Вт на частоте 800 МГц

А.С. Будяков¹, Е.М. Савченко¹, А.А. Пронин¹, П.А. Козылко²

¹ФГУП «НПП «Пульсар», budyakov@pulsarnpp.ru

²Московский государственный институт электроники и математики (технический университет), eande@miem.edu.ru

Аннотация — Представлены результаты измерения СВЧ монолитной интегральной схемы усилителя мощности на основе кремниевой технологии с выходной мощностью 1 Вт на частоте 800 МГц. Описываются основные проблемы проектирования монолитных интегральных СВЧ усилителей мощности на основе кремниевой технологии и способы их решения.

Ключевые слова — монолитные СВЧ усилители мощности, кремниевые транзисторы, SiGe, термическая устойчивость, саморазогрев.

- возможность встраивания схем расширяющих функциональные возможности (детектор выходной мощности, подсхема отключения питания, подсхема управления выходной мощностью и т.д.);
- возможность интеграции в СнК;
- улучшенные условия для отвода тепла.

Для минимизации внешних цепей обвязки входную и выходную цепь согласования МИС СВЧ усилителей мощности реализуют на кристалле. Однако, ввиду малых значений удельного сопротивления кремниевой подложки и относительно низкой проводимости тонких слоев металлизации, добротность индуктивных элементов цепей согласования интегрированных на кристалл имеет низкие значения ($Q < 15$), что в значительной мере ограничивает энергетические параметры монолитных СВЧ усилителей мощности. Так в соответствии с [8], если в выходной Г-образной цепи согласования значение добротности катушки индуктивности $Q=8$, то при напряжении питания $E_{п}=2,5$ В предельные значения коэффициента полезного действия (КПД) и выходной мощности усилителя ($P_{вых}$), ограниченные только потерями в цепи согласования, составят 51% и 1 Вт соответственно. Таким образом, низкие значения добротности интегральных индуктивных элементов значительно влияют на энергетические параметры СВЧ усилителя мощности, что приводит к необходимости построения схемы таким образом, чтобы минимизировать динамические токи, протекающие во входных и выходных цепях согласования импеданса.

Условие минимизации динамических токов во входной цепи согласования соответствует построение входного каскада по двухтактной схеме с общим эмиттером и выбор транзисторов с высокими значениями граничной частоты усиления по току базы (f_t). Для минимизации динамических токов в выходной цепи согласования, также целесообразно применение двухтактной схемы с общим эмиттером (для сниже-

I. ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие современных систем связи, средств радиолокации привело к необходимости создания высоко интегрированных приемо-передающих систем на кристалле (СнК). Для успешной реализации таких систем необходима разработка монолитных СВЧ усилителей мощности (УМ) на основе кремниевой (Si) и кремний-германиевой (SiGe) технологий.

Активные действия зарубежных ученых в данном направлении подтверждаются многочисленными публикациями, диссертациями [1-6] и целевыми проектами [7], направленными на кооперацию европейского научного сообщества в исследовании проблем проектирования монолитных интегральных схем СВЧ усилителей мощности. В РФ, практически, отсутствуют подобные исследования. Цель данной статьи – привлечь внимание российских ученых и разработчиков к данной теме и поделится имеющимся опытом практической разработки.

Традиционно СВЧ монолитные интегральные схемы (МИС) усилителей мощности реализуются по GaAs технологии, что обуславливает их высокую стоимость (в случае массового производства) и низкую степень интеграции. СВЧ усилители мощности на основе кремниевой технологии обладают следующими преимуществами:

- относительно низкая стоимость;

ния динамических токов в цепи согласования межкаскадной связи), однако выходные транзисторы следует выбирать с высокими пробивными напряжениями коллектор-эмиттер ($U_{КЭ,МАХ}$). Так как параметры биполярного транзистора f_t и $U_{КЭ,МАХ}$ находятся в противоречии [9], то для реализации МИС СВЧ усилителя мощности перспективной является двухкаскадная двухтактная схема: первый каскад на транзисторах с высокими значениями f_t (низкими значениями $U_{КЭ,МАХ}$), второй каскад на транзисторах с высокими значениями $U_{КЭ,МАХ}$ (низкими значениями f_t). Эффективным способом снижения динамических токов в цепях согласования является применение делителей/сумматоров мощности на входе и выходе СВЧ усилителя мощности [10].

Повышение граничной частоты кремниевых транзисторов осуществляется главным образом за счет снижения эффекта Кирка, путем увеличения степени легирования в коллекторной области. Однако такой подход приводит к снижению пробивных напряжений коллектор-эмиттер. Появление гетеробиполярных SiGe транзисторов позволило добиться значительного повышения f_t без снижения $U_{КЭ,МАХ}$. Что позволяет говорить о SiGe технологии как перспективной для построения монолитных МИС СВЧ усилителей мощности. Однако стоимость изготовления изделий на основе SiGe технологии все еще относительно высока, поэтому решение проблем разработки СВЧ УМ на основе стандартной Si технологии является актуальной задачей. Опыт, полученный при разработке Si монолитных СВЧ УМ, может быть достаточно просто перенесен в разработки СВЧ УМ на основе SiGe технологии.

Транзисторы интегрального СВЧ УМ обычно работают в предельно допустимых режимах, поэтому для построения точной модели интегрального СВЧ УМ требуются модели транзисторов, учитывающие сложные нелинейные эффекты (начальный участок электрического пробоя, распределенный характер входной цепи базы, сложная зависимость граничной частоты от тока коллектора и т.д.). Как правило, стандартной модели Гуммеля-Пуна недостаточно и требуется применение более сложных моделей, например VBIC, MEXTRAM [11].

Повышение качественных показателей МИС СВЧ усилителей мощности, как правило, достигается путем применения нестандартных технологических решений, таких как сквозные контакты от эмиттера к обратной металлизированной стороне кристалла [12], оптимизация слоев мощной транзисторной структуры в вертикальном направлении [13] и т.д.

В данной статье приводятся результаты разработки МИС СВЧ усилителя мощности, изготовленного по стандартной кремниевой технологии на транзисторах с граничной частотой 20 ГГц и напряжением пробоя

коллектор-эмиттер 5 В, тремя уровнями алюминиевой металлизации с толщиной верхнего уровня 2 мкм. Услуги по изготовлению были оказаны сторонней foundry фабрикой, ввиду чего применение технологических методов повышения качественных показателей было ограничено. Недостаточная точность описания моделей транзисторов (стандартная модель Гуммеля-Пуна) привела к необходимости разделения задачи на несколько этапов: 1) разработка однокаскадного СВЧ УМ с входным интегральным симметрирующим трансформатором; 2) разработка двухкаскадной схемы с интегральными симметрирующими трансформаторами на входе и выходе; 3) разработка СВЧ УМ с суммированием мощности от нескольких выходных каскадов. Разделение задачи позволит выявить проблемы, возникающие в отдельных каскадах СВЧ УМ, и упростит поиск методов их решения.

II. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

В предлагаемом варианте усилителя мощности была использована двухтактная однокаскадная схема с включением транзисторов с общим эмиттером и входной цепью согласования на основе интегрального симметрирующего трансформатора, рис. 1. Выходная цепь подключается через внешний симметрирующий трансформатор, который может быть реализован на дискретных элементах поверхностного монтажа или в виде полосковой конструкции [14].

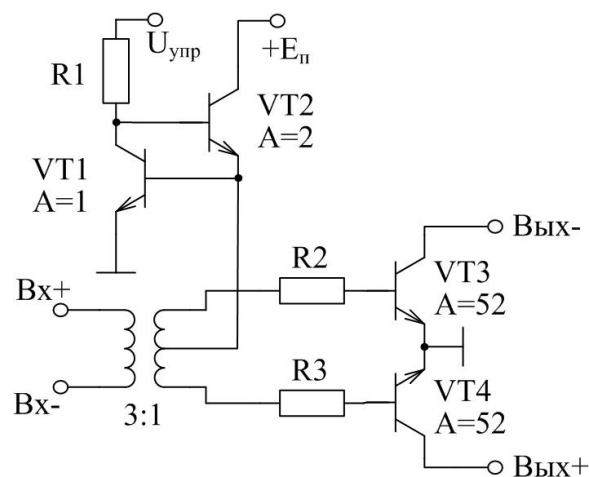


Рис. 1. Упрощенная схема МИС СВЧ усилителя мощности

Для обеспечения заданного тока в нагрузке, транзисторы усилительного каскада были составлены из 52 стандартных транзисторов (каждый рассчитан на ток до 10 мА), соединенных параллельно. Выбор рабочей точки осуществляется подачей управляющего напряжения $U_{упр}$ (рис. 1), кроме того данный вход можно использовать для управления при работе в импульсном режиме.

Устойчивость усилителя обеспечивается включением стабилизирующих резисторов R2, R3 и резисторов (на схеме не показаны) в подсхеме обеспечения статического режима, а также разделением цепей заземления подсхемы установления статического режима, выходного каскада и вывода смещения на подложку. Так как усилитель мощности является существенно нелинейной системой, то исследование устойчивости проводилось в режиме малого сигнала при всевозможных вариантах статического режима в пределах рабочего диапазона изменения токов. Моделирование S-параметров усилителя проводилось в среде Cadence ADE с использованием симулятора SpectreRF [15] после экстракции паразитных параметров топологии кристалла.

III. РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Для устойчивого теплового режима транзисторов выходного каскада СВЧ УМ необходимо исключить эффект шнурования тока (вследствие саморазогрева) и неравномерное распределение тока (локальных областей перегрева) между отдельными элементами мощной транзисторной структуры.

Основным способом обеспечения термической устойчивости [16] кремниевых транзисторов является включение стабилизирующих резисторов в эмиттер каждого элемента транзисторной структуры. В случае применения гетеробиполярных транзисторов на основе SiGe, резисторы обеспечения стабильного теплового режима можно включать в цепь базы, так как в противоположность кремниевым транзисторам их коэффициент усиления по току базы снижается с ростом температуры [17]. Следует заметить, что включение стабилизирующего резистора в цепь эмиттера может привести к существенному снижению КПД усилителя мощности. Поэтому выбор сопротивления стабилизирующего резистора необходимо производить исходя из компромисса между необходимым запасом по термической устойчивости и допустимым снижением КПД.

Минимальное сопротивление эмиттерного стабилизирующего резистора (вместе с сопротивлением эмиттерного контакта) по критерию заданной разности токов эмиттера элементов транзисторной структуры, было определено из выражения [16]:

$$r_{ст} = r_э + R_э = (kT_k / qI_{э0}) [\alpha_{10} \Delta T_n (I_{э0} / \Delta I_{э0}) - 1], \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана, q - заряд электрона, $I_{э0}$ - ток эмиттера элемента расположенного в центре транзисторной структуры, $\Delta I_{э0}$ - заданная максимально допустимая разность токов эмиттера элементов транзисторной структуры, α_{10} - температурный коэффициент эмиттерного тока в отсутствие стабилизирующих резисторов, ΔT_n - максимальная разность

температуры перехода элементов транзисторной структуры, T_k - температура корпуса, $R_э$ - сопротивление эмиттерного стабилизирующего резистора, $r_э$ - контактное сопротивление транзистора к активной эмиттерной области.

Максимальная разность температур между элементами транзисторной структуры на этапе разработки была определена с помощью подсистемы электротеплового моделирования [18]. После изготовления опытных образцов были проведены измерения с помощью тепловизора FLIR Systems A40. По результатам моделирования и эксперимента максимальная разность температуры между элементами транзисторной структуры СВЧ УМ, рис. 1, не превышает 4,8 град. С. Экспериментально снятая зависимость температуры от координаты в сечении кристалла приведена на рис. 2.

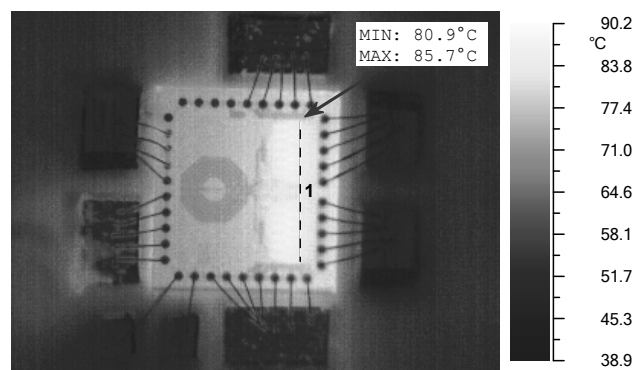


Рис. 2. Распределение температуры в сечении 1 транзисторной структуры СВЧ УМ

На рис. 3 приведена зависимость минимально допустимого значения стабилизирующего резистора от относительного изменения токов эмиттера, при токе эмиттера центрального элемента транзисторной структуры, соответствующего предельно допустимому режиму $I_{э0}=10$ мА.

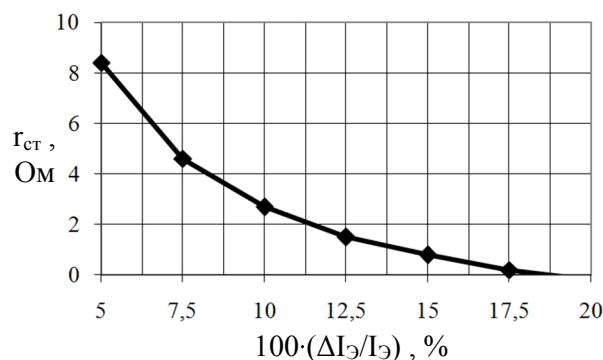


Рис. 3. Зависимость минимального сопротивления стабилизирующего резистора от допустимого изменения токов эмиттера элементов транзисторной структуры

Из рис. 3 следует, что в качестве эмиттерных стабилизирующих резисторов, возможно использование

контактного сопротивления транзисторов к активной эмиттерной области, составляющего в данном случае $r_3=2$ Ом.

В соответствии с методикой приведенной в [16] было определено, что сопротивление контакта к активной эмиттерной области достаточно велико, чтобы исключить появление эффекта шнурования тока в транзисторах данного СВЧ УМ.

IV. РАЗРАБОТКА СИММЕТРИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА

Входной симметрирующий трансформатор построен на основе двух магнитно связанных катушек индуктивности с боковой связью, вложенных друг в друга, рис. 4. Соотношение витков 3:1 достигается за счет последовательного соединения витков первичной обмотки и параллельного соединения витков вторичной обмотки.

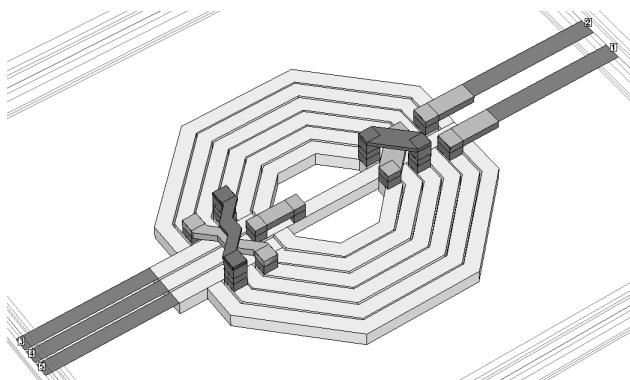


Рис. 4. Трехмерная модель симметрирующего трансформатора

Симметричная топология трансформатора позволяет обеспечить значения разбаланса по фазе и амплитуде 1^0 и $0,1$ дБ соответственно, в диапазоне частот 700 МГц – 900 МГц.

Электромагнитное моделирование трансформатора было проведено с использованием метода моментов в программе Sonnet [19]. Матрица рассеяния симметрирующего трансформатора, полученная при электромагнитном моделировании, была преобразована в широкополосную полиномиальную Spectre модель [19] и импортирована в среду Cadence для моделирования характеристик МИС СВЧ усилителя мощности в линейных и нелинейных режимах.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения параметров МИС СВЧ усилителя мощности была разработана измерительная оснастка по схеме включения, рис. 7. Входная согласующая цепь состоит из внешних конденсаторов C1, C2, которые вводят в резонанс обмотки симметрирующего трансформатора, расположенного на кристалле [20].

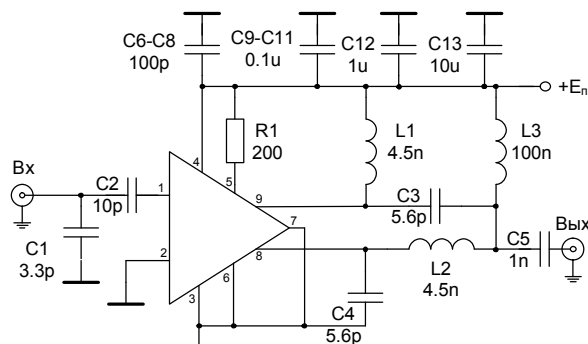


Рис. 7. Схема включения МИС СВЧ усилителя мощности

Согласование выхода с нагрузкой выполнено с помощью симметрирующего устройства на элементах с сосредоточенными параметрами (L1-L3, C3, C4) [20]. Измерительная оснастка [21-24] представляет собой печатную плату из стандартного текстолита с элементами обвязки на основе пассивных элементов для поверхностного монтажа, рис. 8. Кристалл МИС СВЧ усилителя мощности установлен непосредственно на печатную плату, соединения выполнены алюминиевой проволокой на латунные вставки. Отвод тепла осуществляется через сквозные, металлизированные отверстия, выполненные под кристаллом.

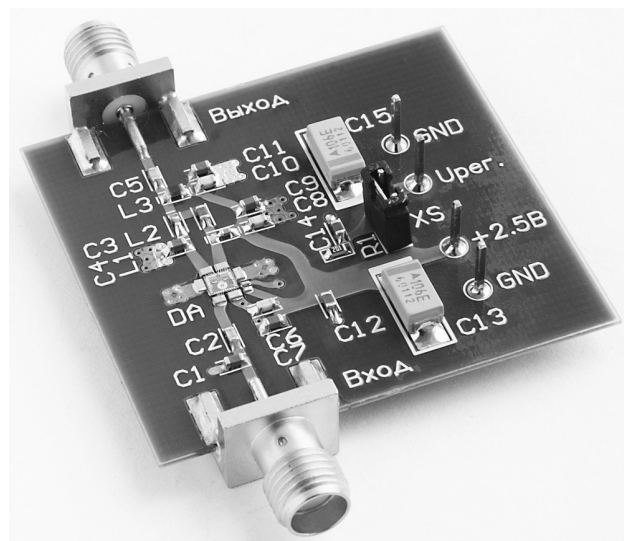


Рис. 8. Внешний вид измерительной оснастки (без охлаждающего радиатора)

На рис. 9 приведена фотография топологии кристалла, разработанной МИС СВЧ усилителя мощности. В левой части топологии расположены составные транзисторы усилительного каскада VT2-VT3 (рис. 1). Для повышения тепловой связи транзистор в диодном включении VT1 установлен между транзисторами VT2-VT3. Остальная часть подсхемы обеспечения статического режима расположена в правой верхней части топологии кристалла. Размер кристалла составляет $2,2 \times 2,4$ мм².

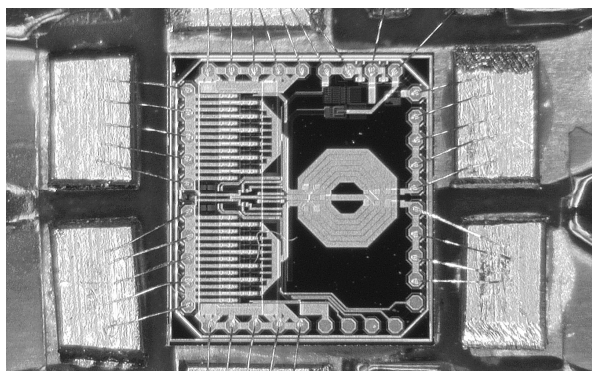


Рис. 9. Топология кристалла МИС СВЧ усилителя мощности

На рис. 10 приведены частотные характеристики коэффициента передачи и потерь на отражение на входе для МИС СВЧ усилителя мощности в линейном режиме работы.

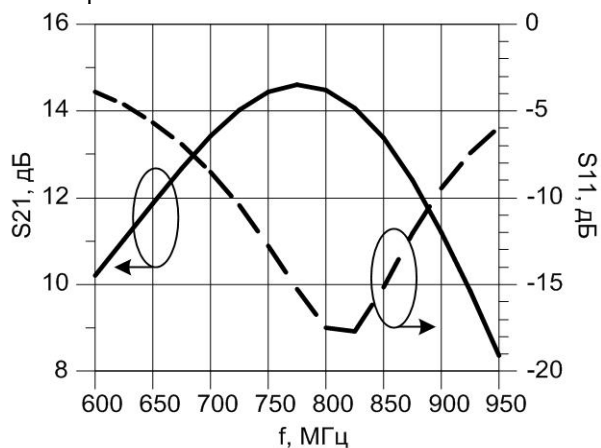


Рис. 10. Частотные характеристики МИС СВЧ усилителя мощности в линейном режиме

На рис. 11 - рис. 13 приведены энергетические характеристики МИС СВЧ усилителя мощности в нелинейном режиме работы на центральной частоте рабочего диапазона 800 МГц, на рис. 14 - частотная зависимость выходной мощности.

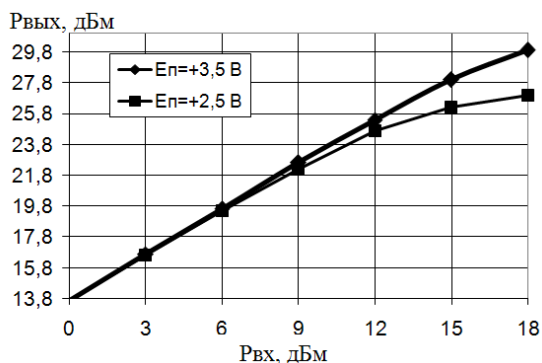


Рис. 11. Зависимость выходной мощности от входной для МИС СВЧ усилителя мощности на частоте 800 МГц при $E_{п}=+2,5$ В и $E_{п}=+3,5$ В

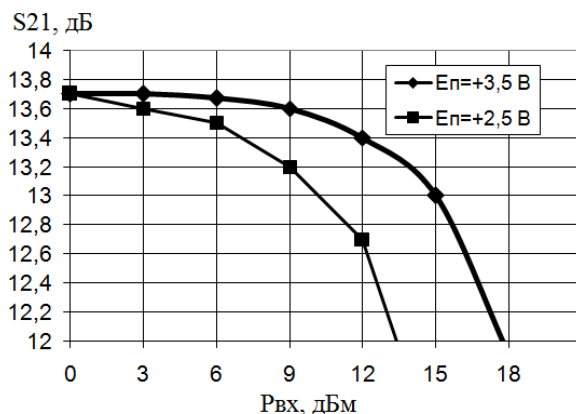


Рис. 12. Зависимость коэффициента усиления от входной мощности для МИС СВЧ усилителя мощности на частоте 800 МГц при $E_{п}=+2,5$ В и $E_{п}=+3,5$ В

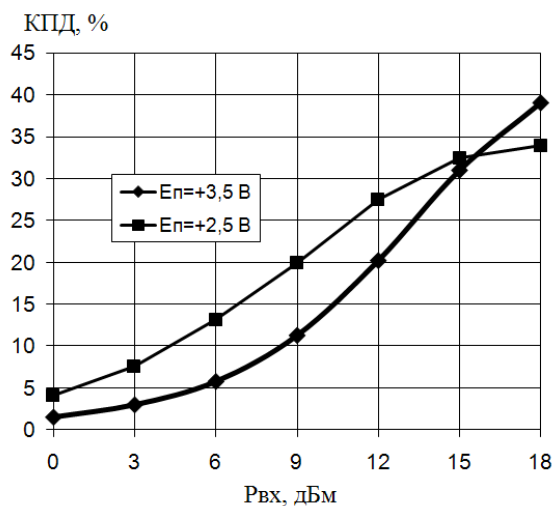


Рис. 13. Зависимость коэффициента полезного действия (с учетом мощности отбираемой от источника сигнала) от входной мощности для МИС СВЧ усилителя мощности на частоте 800 МГц при $E_{п}=+2,5$ В и $E_{п}=+3,5$ В

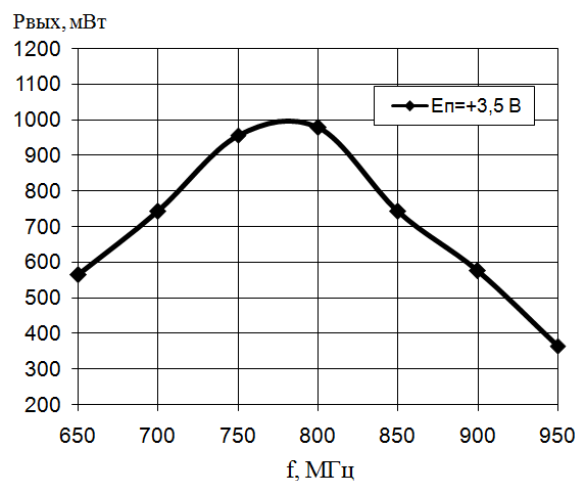


Рис. 14. Частотная зависимость выходной мощности МИС СВЧ усилителя мощности при $E_{п}=+3,5$ В

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты исследований подтверждают возможность реализации МИС СВЧ усилителя мощности в базе элементов стандартного кремниевого технологического процесса и целесообразность проведения дальнейших работ по разработке монолитного двухкаскадного варианта ИС СВЧ усилителя мощности с суммированием мощности от нескольких каскадов.

Определен маршрут проектирования и методы расчета, тепловых и электрических параметров, эффективность выбранных методов подтверждена результатами измерений.

Авторы благодарят сотрудника ФГУП «НПП «Пульсар», Давыдова А.Х. за помощь в монтаже кристалла и разварке выводов СВЧ МИС усилителя мощности на печатную плату.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Scuderi A., Paglia L.L., Scuderi A., Carrara F., Palmisano G. A VSWR-Protected Silicon Bipolar RF Power Amplifier With Soft-Slope Power Control // IEEE J. Solid-State Circuits. – 2005. - vol. 40. - P. 611–621.
- [2] Gruner D., Boeck G. 6 GHz SiGe power amplifier with on-chip transformer combining // IEEE MTT-S International. – 2007. – P. 790 – 794.
- [3] Liu G., Haldi P., Liu T.K., Niknejad A.M. Fully Integrated CMOS Power Amplifier With Efficiency Enhancement at Power Back-Off // IEEE J. Solid-State Circuits. – 2008. - vol. 43. - P. 600–609.
- [4] Vasylyev A. Integrated RF Power Amplifier Design in Silicon Based Technology / Диссертация на соискание степени доктора наук. – 2006. - Berlin, Germany.
- [5] Liu G. Fully Integrated CMOS Power Amplifier / Диссертация на соискание степени доктора наук. – 2006. - Berkeley, USA.
- [6] Kitlinski K. Design of Integrated Power Amplifiers in SiGe Technology for Mobile Terminal Applications / Диссертация на соискание степени доктора наук. – 2006. – Erlangen, Germany.
- [7] <http://www.target-net.org>.
- [8] Aoki I., Kee S., Rutledge D., Hajimiri A. A Fully-Integrated 1.8V, 2.8W, 1.9G, CMOS Power Amplifier // Proc. of IEEE RFIC Symposium, June 2003.
- [9] Johnson, E. O. Physical Limitations on Frequency and Power Parameters of Transistors // RCA Review, 26 (June 1965), - P. 163-77.
- [10] Vasylyev A., Weger P., Bakalski W., Simbuerger W. Fully-integrated 32 dBm, 1.5-2.9 GHz SiGe-bipolar power amplifier using power-combining transformer // IEEE Electronics Letters. – 2005. - vol. 41, № 16. - P. 908-909.
- [11] Петросянц К.О., Торговников Р.А. Сравнительный анализ схемотехнических моделей SiGe гетеробиполярного транзистора // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2006. Сборник научных трудов / под общ. ред. Академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИПИМ РАН, 2006, С. 235-239.
- [12] Bakalski, W.; Sogl, B.; Zannoth, M.; Asam, M.; Kapfelperger, B.; Berkner, J.; Eisener, B.; Thomann, W.; Marcon, S.; Osterreicher, W.; Napieralska, E.; Rampf, E.; Scholtz, A.L.; Klepser, B. A Quad-Band GSM/EDGE-Compliant SiGe-Bipolar Power Amplifier // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - 2008. - V. 43. - № 9. - P. 1920 – 1930.
- [13] Carrara F., Castorina A., Scuderi A., Palmisano G. High Performance Silicon Bipolar Power Amplifier for 1.8 GHz Applications // Microwave Symposium Digest. - 2002 IEEE MTT-S International V.2, - P. 1015 – 1018.
- [14] Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний / под ред. З. И. Моделя. М.: Сов. радио, 1980.
- [15] www.cadence.com – сайт компании Cadence.
- [16] Никишин В.И., Петров Б.К., Сынов В.Ф. Проектирование и технология производства мощных СВЧ-транзисторов. — М.: Радио и связь, 1989.
- [17] Liu W., Khatibzadeh A., Sweder J., Chau H. F. The use of base ballasting to prevent the collapse of current gain in AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors // IEEE Trans. Electron Devices. – 1996. 43(2). – P. 245-251.
- [18] Петросянц К.О., Рябов Н.И., Харитонов И.А., Козынько П.А. Реализация процесса электротеплового моделирования в САПР БИС Mentor Graphics // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2008. Сборник научных трудов / под общ. ред. Академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИПИМ РАН, 2008, С. 243-246.
- [19] <http://www.sonnetsoftware.com> - сайт компании Sonnet Software.
- [20] Simbürger W., Wohlmuth H. D., Weger P., Heinz A. A monolithic transformer coupled 5 W silicon power amplifier with 59% PAE at 0.9 GHz // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1999. - vol. 34. - P. 1881–1892.
- [21] Будяков А.С., Савченко Е.М. Анализ основных направлений построения интегральных СВЧ усилителей мощности L и S диапазона частот с выходной мощностью, до 2,5 Вт на основе кремниевых транзисторов // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2008, С. 103 – 105.
- [22] Будяков А.С., Савченко Е.М., Пронин А.А., Давыдов А.Х. Интегральный СВЧ усилитель мощности L диапазона частот с выходной мощностью 0,5 Вт на основе кремниевых транзисторов // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2009, С. 65 – 66.
- [23] Козынько П.А., Будяков А.С., Пронин А.А. Исследование теплового режима работы интегрального усилителя мощности // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2009, С. 90 – 91.
- [24] Пронин А.А., Будяков А.С., Савченко Е.М. Разработка оснастки для исследования параметров СВЧ усилителя мощности с обеспечением нормального теплового режима функционирования // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2009, С. 100.