

УДК 621.371.32 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.4.44.50

Усилитель мощности приемо-передающего модуля активной фазированной решетки *Ka*-диапазона частот

А. В. Буйанкин, *buiyankin.av@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Трунова, *trunova.ay@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Нелин, *к. в. н.*, *innovation@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Л. Е. Рагулина, *к. ф.-м. н.*, *ragulina.le@mipt.ru*

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация

М. В. Рыжаков, *mryzhakov@aplmtech.mipt.ru*

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. В ходе разработки опытного образца приемо-передающего модуля (ППМ) активной фазированной антенной решетки (АФАР) на основе комбинирования технологии многослойных печатных сверхвысокочастотных (СВЧ) плат и управляющей системы на кристалле при разработке технического проекта ППМ АФАР внимание было акцентировано на описание процедуры разработки монолитного усилителя мощности (УМ) диапазона частот 32–35 ГГц, выполненного по 0,1 мкм GaN-pHEMT-технологии, с помощью СВЧ-систем автоматического проектирования.

Цель работы — обоснование возможности создания усилителя мощности с управляющей системой на кристалле. Подтверждение возможности создания было проведено с помощью современных систем автоматического проектирования и моделирования. Представлен в модели усилитель мощности, разработанный по технологии pHEMT 0,1 мкм. Проведены исследования по оптимизации топологии усилителя мощности для ППМ АФАР. Результаты исследования были использованы для проектирования схемы и топологии усилителя в средах Microwave Office и Advanced Desing System. Приведенные результаты расчетов показывают, что усилитель, работающий на частоте 34 ГГц, достигает коэффициента усиления 13 дБ.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, МИС, усилитель мощности, pHEMT, активная фазированная антенная решетка, АФАР

Power Amplifier for the Transceiver Module of a *Ka*-band Active Phased Array

A. V. Buyankin, *buyankin.av@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. Yu. Trunova, *trunova.ay@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Nelin, *Cand. Sci. (Mil.), innovation@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

L. E. Ragulina, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), ragulina.le@mipt.ru*

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation

M. V. Ryzhakov, *mryzhakov@applmech.mipt.ru*

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation

Abstract. In the course of the development of a transceiver module (TRM) prototype for an active phased array antenna (APAA, AESA) based on the combination of multilayer microwave (MW) printed circuit boards and control system-on-chip (SoC) technologies, during technical design of the APAA transceiver module, the attention was focused on the description of the development procedure of a monolithic power amplifier (PA) of the 32–35 GHz frequency range, created using microwave computer-aided engineering systems with the implementation of the 0.1 μm GaN pHEMT technology.

The aim of the work is the justification of the possibility of creating a power amplifier with a SoC control system. The feasibility of the project was proved with the help of modern automated design and simulation systems. A model of the power amplifier designed with use of the 0.1 μm pHEMT technology is presented. Studies were conducted to optimize the layout of the power amplifier of the APAA transceiver module. The research results were used to design the circuit and layout of the amplifier in the Microwave Office and Advanced Design System environments. The provided calculation results demonstrate that an amplifier operating at a frequency of 34 GHz reaches a gain of 13 dB.

Keywords: monolithic integrated circuit (MIC), power amplifier, pHEMT, active phased array antenna, APAA, AESA

В настоящее время наблюдается стремительное развитие космических систем радиолокации и связи, что влечет за собой существенное увеличение количества космических аппаратов (КА) и увеличение объемов передаваемой информации по каналам связи. При этом частотный ресурс в разрешенных диапазонах P , L , S , C , X существенно ограничен и в большинстве случаев занят существующими системами. В связи с этим перед разработчиками перспективных космических систем связи стоит задача освоения миллиметровых диапазонов K , Ka , Q для решения задач связи как между КА, так и между КА и наземными станциями [1]. Одна из современных тенденций — рост применения активных фазированных антенных решеток (АФАР) в космических аппаратах.

Актуальность этого подтверждается проводимыми в настоящее время комплексными проектами по созданию высокотехнологичных производств, в том числе и приемо-передающих модулей активной фазированной антенной решетки на основе современных технологий. Так, материал данной статьи подготовлен на основе работы, выполненной в рамках комплексного проекта АО «Российские космические системы» и Московского физико-технического института по Соглашению с Минобрнауки России от 31.05.2018 № 074-11-2018-014, (заключено на основании Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, в рамках подпрограммы “Институциональное развитие научно-исследовательского сектора” государственной программы Российской Федерации “Развитие науки и технологий на 2013–2020 годы”»).

Решаемая комплексная задача при этом является сложной как с научной, так и с производственной и технологической точек зрения.

Одной из главных задач при создании приемо-передающих модулей Ka -диапазона частот является увеличение мощности передатчика. Для решения данной задачи требуется создание монолитной интегральной схемы (МИС) УМ с выходной

мощностью более 1 Вт. Наиболее подходящие технологии для создания УМ Ka -диапазона частот — технологии pHEMT GaN с топологической нормой 0,1 мкм [2].

В своей книге « $\text{AlGaIn/GaN-HEMT Power Amplifiers with Optimized Power-Added Efficiency for X-band Applications}$ » [3] еще в 2010 году Jutta Kuhn, ученый из Фраунгофера, обратила внимание на то, что производительность всей системы спутниковой связи особенно зависит от передающего канала, который сильно ограничен максимальной выходной мощностью последнего усилителя. Это становится очевидным, когда требуется систему построить в миллиметровом диапазоне частот. Причиной этому является уменьшение количества полупроводников для достижения высоких рабочих частот, однако ставит под угрозу возможность управления мощностью. В этой связи использование новых перспективных технологий, таких как GaN , обеспечивает высокую удельную мощность, эффективность и широкополосность.

На конференции, проходившей в 2014 году в городе Синдай (Япония), ученые В. Y. Chen, С. С. Chiong и Н. Wang представили разработанный малошумящий усилитель мощности K -диапазона частот, реализованный на технологии 0,1 мкм GaAs pHEMT . МШУ достигает усиления в 29 дБ на частотах 18,5–30 ГГц при потреблении 27 мВт [4].

В представленной работе по созданию и разработке усилителя мощности Ka -диапазона частот для ППМ АФАР космического аппарата возникает необходимость интеграции УМ непосредственно в антенну. К блоку могут быть предъявлены более жесткие требования по внешним воздействующим факторам (ВВФ), в особенности в части спецфакторов. В связи с этим технология создания МИС должна быть в наименьшей степени подвержена воздействию космических излучений и т. п.

Немаловажным показателем применимости в системах спутниковой связи является широкополосность усилителя. Широкая полоса позволяет утверждать, что при работе устройства в выделенных диапазонах частот заявленные характеристики будут выдерживаться вне зависимости от конструктивных допусков и ЭМС при проектировании системы [5].

Требуемые параметры усилителя мощности представлены в таблице.

Т а б л и ц а. Требуемые параметры усилителя мощности

| № п/п | Наименование параметра, единица измерения | Буквенное обозначение параметра | Норма параметра | |
|-----------|---|---------------------------------|-----------------|----------|
| | | | не менее | не более |
| Параметры | | | | |
| 1 | Диапазон рабочих частот, ГГц | f | 32 | 35 |
| 2 | Коэффициент усиления, дБ | K_y | 18 | – |
| 3 | Выходная мощность, дБмВт | $P_{\text{вых}}$ | 37 | |
| 4 | КСВН входа/выхода | $K_{\text{ст}U}$ | | 2 |
| 5 | Ток потребления, мА | I | | 1500 |

Разработан 4-каскадный УМ на основе процесса рНЕМТ 0,1 мкм. Напряжение питания 5 В. Принципиальная схема УМ с учетом микрополосковых линий представлена на рис. 1.

На основе принципиальной схемы сгенерирована топология усилителя. Размер МИС МШУ 2500×1000 мкм. Расчетный ток потребления менее 1500 мА. Топология МИС УМ представлена на рис. 2.

Моделирование топологии было произведено без транзисторов. Затем из топологии создается символ и экспортируется в схемотехнический редактор. К портам символа топологии подключаются транзисторы в схемотехническом редакторе. Моделирование происходит с использованием результатов электромагнитного моделирования топологии и моделей транзисторов, взятых в схемотехническом редакторе. Результат моделирования МИС УМ с учетом электромагнитного моделирования представлен на рис. 3.

В процессе разработки УМ проведено моделирование выходной мощности. В результате разработки в УМ достигнуто значение выходной мощности на уровне 37 дБм. Значение выходной мощности МИС УМ представлено на рис. 4.

Результаты моделирования коэффициента усиления МИС УМ в схемотехническом и топологическом редакторах представлены на рис. 5.

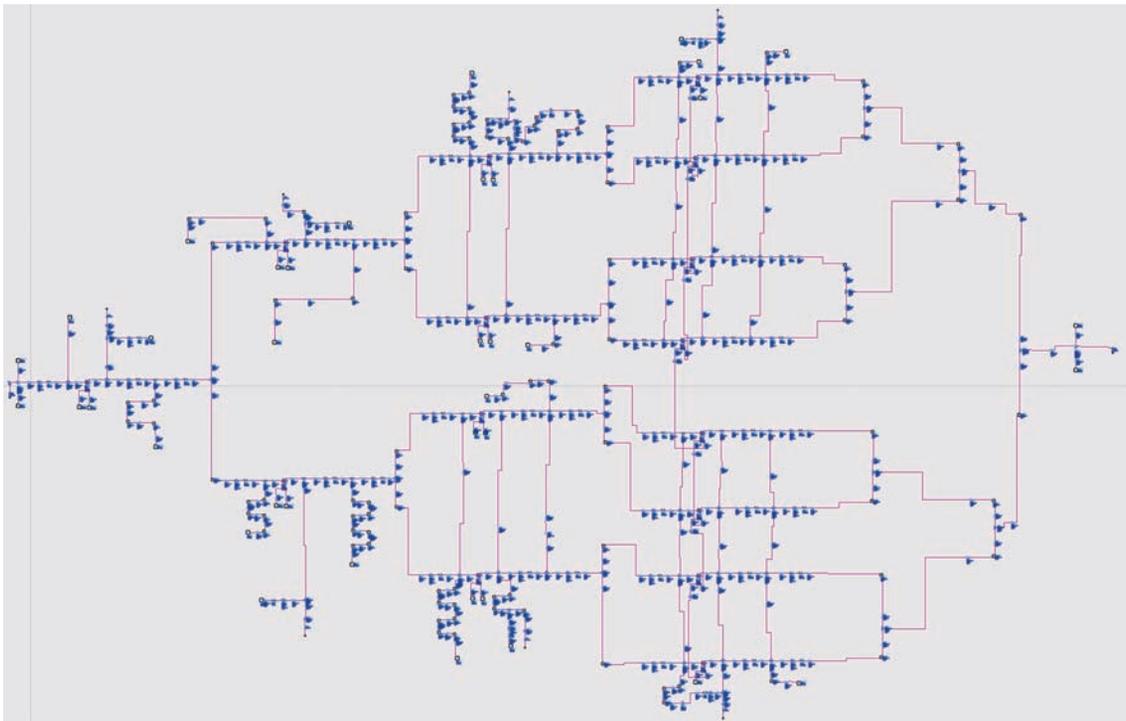


Рис. 1. Принципиальная схема УМ с учетом микрополосковых линий

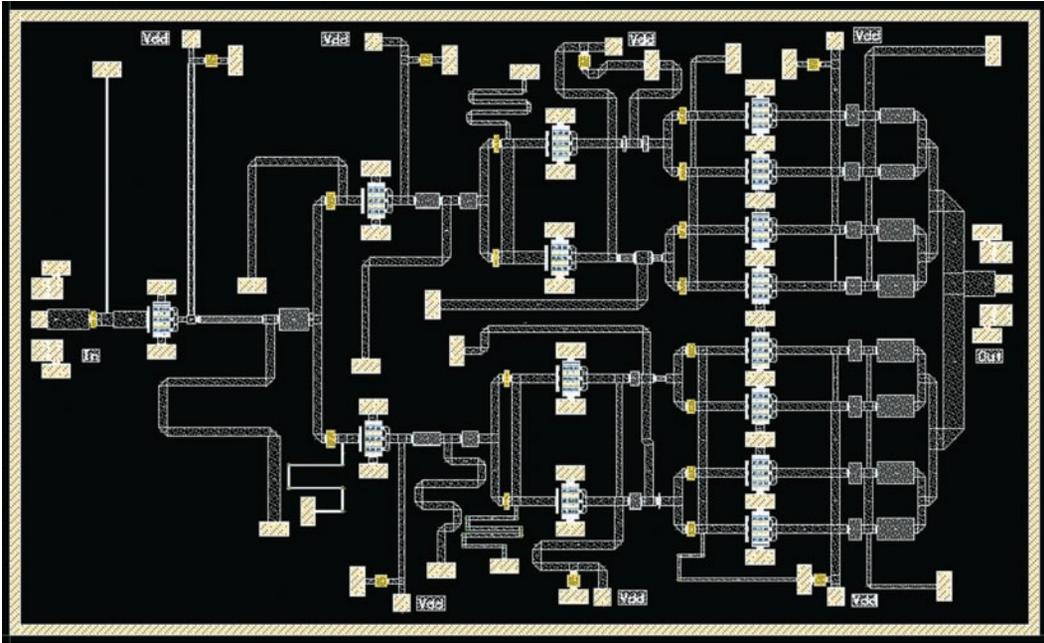


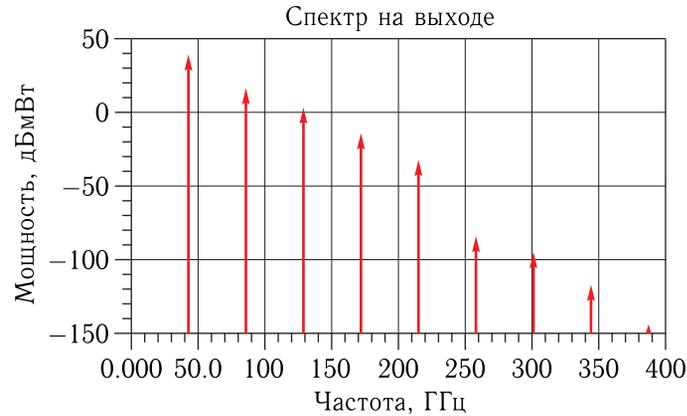
Рис. 2. Топология МИС усилителя мощности



Рис. 3. Моделирование МИС УМ с учетом электромагнитного моделирования

Результаты топологического моделирования соответствуют ожиданиям. Усиление, полученное в топологии, в среднем на 2 дБ меньше, чем результаты схемотехнического проектирования.

Результаты (рис. 6) топологического моделирования в части коэффициента отражения по входу оказались лучше, чем результаты схемотехнического моделирования.



| | | | |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Частота несущей, ГГц | Мощность входного сигнала, дБм | Мощность несущей на выходе, дБм | Коэффициент преобразования |
| 33,00 | 31,00 | 37,459 | 6,459 |
| Вторая гармоника, дБн | Третья гармоника, дБн | Четвертая гармоника, дБн | Пятая гармоника, дБн |
| -23,48 | -36,90 | -53,27 | -72,38 |

Рис. 4. Значение выходной мощности МИС УМ

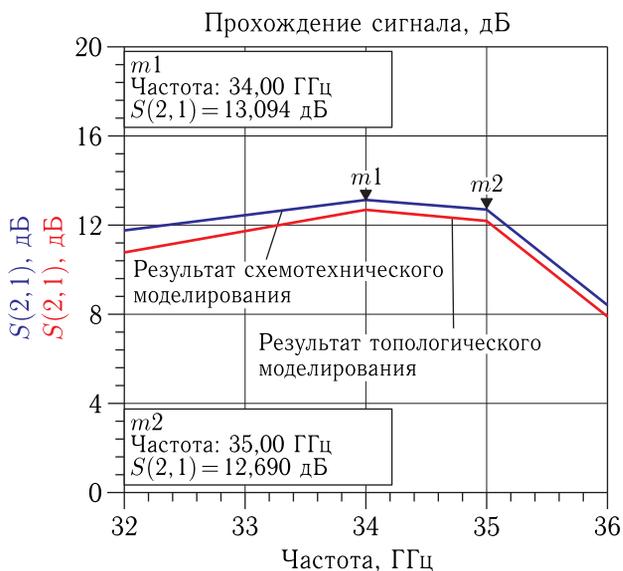


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования коэффициента усиления (S_{21}) МИС УМ

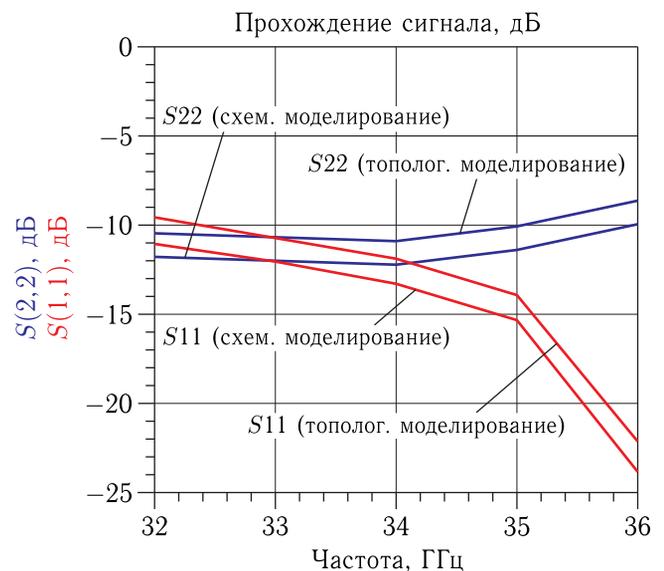


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования коэффициентов отражения (S_{11}, S_{22}) МИС УМ

Выводы

Исходя из проведенного моделирования можно прийти к выводу, что прогноз по наиболее

оптимальному использованию технологии phemt 0,1 мкм для создания УМ *Ka*-диапазона частот был подтвержден. Разработанная топология МИС УМ может быть использована с необходимыми

конструктивными изменениями для создания передающего тракта ППМ АФАР Ka-диапазона частот, разрабатываемого в комплексном проекте АО «Российские космические системы» и Московского физико-технического института.

Статья выполнена при финансовой поддержке Минпромнауки РФ по договору с АО «Российские космические системы» от 31.05.2018 № 074-11-2018-014, заключенного на основании постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

Список литературы

1. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Галиев Г. Б. и др. Монолитные интегральные схемы малошумящих усилителей КВЧ-диапазона на GaAs pHEMT-гетеро-структурах // Доклады ТУСУРа, 2010, № 2(22), ч. 1. С. 49–55.
2. Yang Ziqiang, Yang Tao, Liu Yu. The design of a Ka-band low noise amplifier MMIC[J] // Journal of Microwaves, 2007, Vol. 23 (3). P. 39–42.
3. Jutta Kuhn. AlGaIn/GaN-HEMT Power Amplifiers with Optimized Power-Added Efficiency for X-band Applications, 2010.
4. Chen B. Y., Chiong C. C., Wang H. A high gain K-band LNA in GaAs 0.1- μm pHEMT for radio astronomy application. In: Microwave Conference. Sendai. 2014. P. 226–228.
5. Gang Wang, Wei Chen, Jiarui Liu, Jiongiong Mo, Hua Chen, Zhiyu Wang, Faxin Yu. Design of a broadband Ka-band MMIC LNA using deep negative feedback loop // IEICE Electronics Express, 2018, vol. 15, iss. 10. P. 20180317.