

УДК: 623.41

DOI: 10.53816/20753608_2021_4_74

МИКРОЭЛЕКТРОННОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

MICROELECTRONIC VERSION OF RADAR'S TRANSMIT-RECEIVE MODULES

По представлению чл.-корр. РАРАН В.Д. Щукина

Р.Б. Спири́н, А.Е. Гвозде́в, А.В. Немцо́в

3 ЦНИИ МО РФ

R.B. Spirin, A.E. Gvozdev, A.V. Nemtsov

Статья посвящена анализу зарубежных источников по направлениям создания приборов СВЧ- и миллиметрового диапазонов радиоволн для замены в военной аппаратуре приемопередающих модулей на основе нитрида галлия (GaN) и арсенида галлия (GaAs) для гибридно-интегральных конструкций на монокристаллические устройства, обеспечивающих преимущества в быстродействии, массогабаритных показателях и других характеристиках радиоэлектронного вооружения в зависимости от назначения и базирования.

Ключевые слова: перспективные радиолокационные станции разведки и наведения, активная антенно-фазированная решетка, приемопередающий модуль, СВЧ-диапазон радиоволн, миллиметровый диапазон радиоволн, гигагерцовый (ГГц) диапазон радиоволн, микроэлектронное исполнение усилителя, диаграмма направленности антенны, коэффициент усиления антенны.

The article is devoted to the analyses of foreign sources in the line of creating appliances of microwave and millimeter bands of radiowaves for the transmit-receive module's changing in military hardware on the GaN and GaAs bases for the hybrid-integrated design on Monolithic Integrated Circuits, so providing operation speed, mass-dimensional standards and other characteristics of radioelectronic equipment in according to purpose and deployment.

Keywords: advanced radars of intelligence and guidance, active phased array, transmit-receive module, microwave band of radiowaves, millimeter wave band of radiowaves, GHz wave band of radiowaves, microelectronic version of amplifier, aerial diagram, antenna gain.

Как показывают многочисленные научно-технические исследования зарубежных и отечественных специалистов, нанотехнологии в современном мире имеют огромный потенциал для использования в чрезвычайно большом и разнообразном множестве практических областей, в том числе при разработке радиотехнических систем [1–2].

В данной статье рассматриваются частные вопросы анализа микро- и наноматериалов, обосновываются направления для создания

функциональных структур и узлов приемопередающих модулей (ППМ) устройств РЛС и, в частности, МИС-переключатели ППМ на основе нитрида галлия (GaN) и монокристаллических интегральных схем (МИС) на основе арсенида галлия (GaAs) в СВЧ-диапазоне радиоволн применительно к РЛС военного назначения.

В работах [2, 3] достаточно подробно представляются материалы по ППМ на основе МИС, которые будут внедряться в качестве основных элементов в антенные системы, в том числе и в ак-

тивные фазированные антенные решетки (АФАР). В данных работах отмечается, что для разработки ППМ АФАР в настоящее время в США и Франции проводятся исследования использования в качестве их основы микросхем GaN-модулей на замену СВЧ-микросхем на основе GaAs. Чтобы сократить отставание от США, европейские компании предпринимают энергичные меры по развитию технологии GaN-микросхем для ППМ.

Материалы исследований практического применения переключателей и усилителей приемопередающих модулей на основе микросхем GaN достаточно полно представлены в [4].

Следует подчеркнуть, что мощность ППМ на нитриде галлия на порядок выше, чем у арсенид галлиевых устройств. Поэтому АФАР, реализованные на основе таких ППМ, будут иметь либо большую объемную пространственную зону поиска, либо большую дальность сопровождения цели, либо, при прочих равных условиях, существенно меньшую апертуру. При этом GaN ППМ более устойчивы к повышенной температуре и имеют более высокий КПД. Известно, что в состав ППМ входят несколько МИС, в том числе маломощные усилители, предварительные усилители мощности, мощные выходные усилители, переключатели и др. В этой связи и по оценкам компании Thales (Франция), на ППМ и входящие в них МИС приходится около половины стоимости всей АФАР.

Проведенный авторами анализ показывает, что наибольший интерес вызывают следующие устройства, созданные европейскими фирмами.

Комплект микрополосковых МИС-усилителей X-диапазона для ППМ, в который вошли предварительный усилитель, усилитель мощности и маломощный усилитель (МШУ). Комплект разрабатывался совместными усилиями отделения электроники военного назначения компании EADS Deutschland GmbH (г. Ульм, Германия) и Института прикладной физики твердого тела Фраунгофера (г. Фрайбург, Германия) [4]. При этом GaN МИС изготавливались специалистами Института Фраунгофера, тогда как их проектирование и измерение характеристик осуществлялись отделением электроники военного назначения компании EADS.

Этот модуль ППМ был собран на базе трех разработанных GaN МИС-усилителей с использованием промышленной технологии много-

слойной низкотемпературной керамики LTCC. Передающий блок выполнен на основе одного предварительного усилителя, двух параллельно включенных мощных усилителей и циркулятора. Усилители смонтированы на теплоотводе из сплава меди и молибдена (CuMo). Приемный блок включает маломощный усилитель и ограничитель. Для переключения каналов используется GaAs-переключатель.

Полученные результаты показывают возможность реализации GaN-приемопередающих модулей АФАР с выходной мощностью в режиме передачи более 20 Вт и коэффициентом шума приемного канала менее 3 дБ.

На многослойной LTCC-подложке также монтировались импульсные схемы питания мощных GaN МИС на напряжение 30 В, схемы смещения МШУ и управляющая схема переключателя. Характеристики ППМ с тремя GaN МИС приведены на рис. 1.

GaN МИС-усилитель X-диапазона с выходной мощностью 20 Вт для перспективных РЛС с АФАР

Усилитель разработан совместными усилиями компаний SELEX Sistemi Integrati и Consorzio ORTEL, а также Университета Рима и Политехнического института Турина (Италия). МИС с микрополосковой структурой выполнена на GaN HEMT компании SELEX Sistemi Integrati. Эпитаксиальные структуры GaN/AlGaIn/GaN

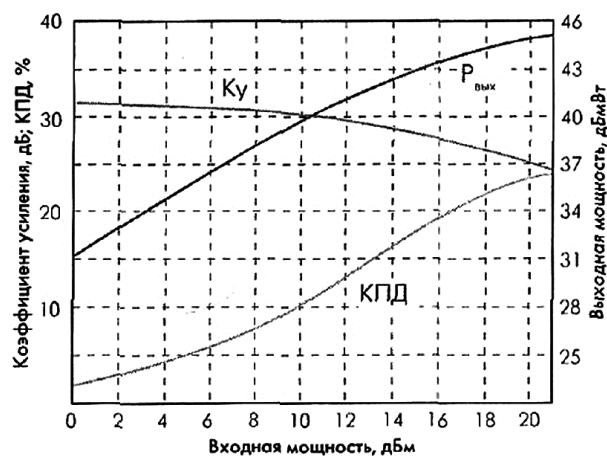


Рис. 1. Характеристики ППМ с тремя GaN МИС-усилителями на многослойной LTCC-подложке в импульсном режиме на частоте 11 ГГц при напряжениях стока $U_c = 30$ В и затвора $U_g = -5$ В

выращивались на полуизолирующих подложках SiC либо MOCVD-методом, либо с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ-методом).

Усилитель спроектирован на диапазон частот 8,5–10,5 ГГц и состоит из двух транзисторных каскадов.

Характеристики усилителя приведены на рис. 2.

Мощные AlGaIn/GaN HEMT (псевдоморфные транзисторы, работающие в режиме обогащения/обеднения) и МИС-усилители диапазонов L/S (1–4 ГГц) и X (8–12 ГГц)

Транзисторы и МИС разработаны совместно Институтом прикладной физики твердого тела Фраунгофера (Фрайбург) и компаниями United Monolithic Semiconductors (Ульм, Германия), и NXP Semiconductors (г. Ниймеген, Нидерланды).

Гетероструктуры GaN/AlGaIn выращивались на SiC-подложке MOCVD-методом в реакторе, позволяющем одновременно обрабатывать 12 пластин диаметром 75 мм.

Выходная мощность двухкаскадного усилителя X-диапазона превышает 11 Вт на частоте 8,56 ГГц при КПД 40% и усилении 17 дБ при компрессии 3 дБ. Выходная мощность однокаскадного МИС-усилителя на частоте 8,24 ГГц при напряжении 20 В составляет 6 Вт, КПД — 55% и линейное усиление — 12 дБ.

Следует также отметить результаты, полученные в диапазоне 2 ГГц для мощных HEMT,

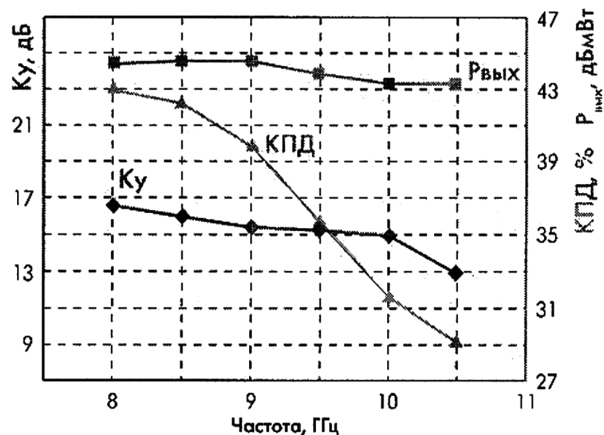


Рис. 2. Частотные характеристики МИС двухкаскадного GaN-усилителя с выходной мощностью 20 Вт в импульсном режиме $T_{имп} = 10$ мкс, $K_y = 1\%$, $U_c = 20$ В, $I_{покой} = 1,8$ А

предназначенных для систем мобильной связи. Так, при напряжении 50 В средняя удельная мощность транзистора была равна 10 Вт/мм при КПД 61,3% и линейном усилении 24,4 дБ. На этой частоте транзисторы устойчиво работали и при повышенном напряжении, равном 100 В. В этом случае удельная мощность транзистора достигала 25 Вт/мм при КПД $\geq 60\%$. Характеристики МИС двухкаскадного GaN-усилителя приведены на рис. 3.

GaN МИС-усилители диапазона 2–6 ГГц для систем РЭБ

Усилители разработаны специалистами Политехнического университета Мадрида, компаний INDRA Sistemas (Мадрид, Испания), SELEX Sistemi Integrati (Рим, Италия), и QinetiQ (г. Малверн, Великобритания) [1].

В ходе работ две компании параллельно разрабатывали две разные конструкции усилителей: микрополосковый вариант на базе технологии компании SELEX и копланарную конструкцию на базе технологии компании QinetiQ.

Благодаря тому, что импеданс GaN HEMT больше чем у GaAs HEMT, то их согласование в выбранной для проектирования усилителей широкой полосе частот 2–6 ГГц упрощается.

Характеристики микросхем обоих типов мощных широкополосных усилителей приведены на рис. 4 и 5. В целом, частотные характеристики усилителя компании QinetiQ соответствовали расчетным за исключением диапазона

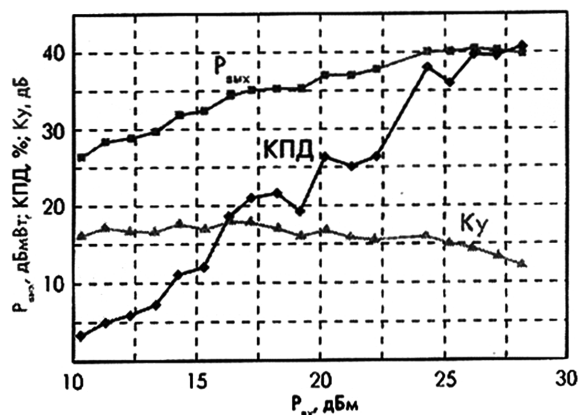


Рис. 3. Характеристики МИС двухкаскадного GaN-усилителя с выходной мощностью более 11 Вт в импульсном режиме класса АВ на частоте 8,56 ГГц при напряжениях стока $U_c = 20$ В и затвора $U_g = -3,5$ В

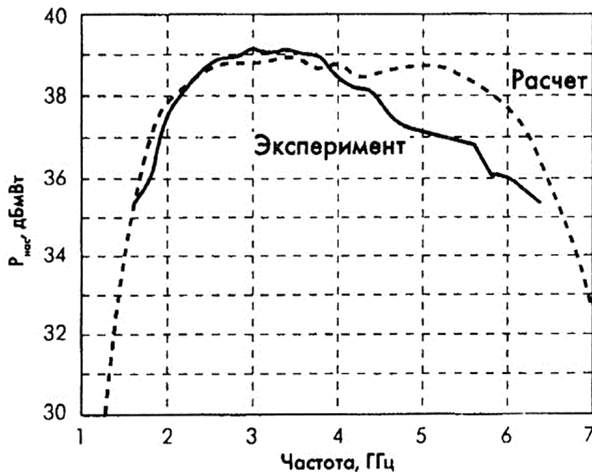


Рис. 4. Частотная зависимость мощности насыщения МИС мощного широкополосного усилителя компланарной конструкции компании QinetiQ с $P_{\text{накс}} = 8 \text{ Вт}$ при напряжениях стока $U_c = 20 \text{ В}$ и затвора $U_g = -4 \text{ В}$

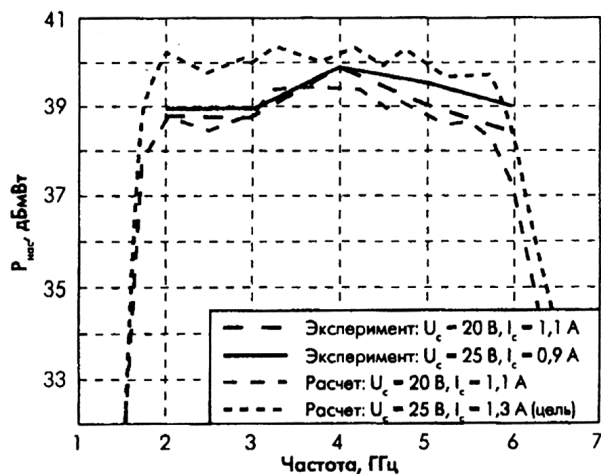


Рис. 5. Частотная зависимость мощности насыщения МИС широкополосного усилителя микрополосковой конструкции компании SELEX

4–6 ГГц, где наблюдалось небольшое отклонение (на 12 дБ) выходной мощности (8 Вт) от расчетного значения. Хорошее соответствие было получено и для коэффициента усиления в режиме малого сигнала (18 дБ) и КПД (20%) [1].

Выбор арсенида галлия обусловлен возможностью изготовления GaAs сверхбольших интегральных систем (СБИС) на полуизолирующих подложках. Однако выход годных GaAs-схем оказался неудовлетворительным из-за низкого качества материала и недостаточной отработанности арсенид галлиевой технологии по сравнению с кремниевой.

Сразу же после завершения программы создания цифровых GaAs-микросхем DARPA была открыта программа Microwave and Millimeter Wave Monolithic Integrated Circuits (MIMIC), целью которой являлось создание приборов СВЧ и миллиметрового диапазонов с требуемыми электрическими, механическими и климатическими характеристиками, цена которых допускала бы их применение в действующих военных системах. В частности, предстояла замена в военной аппаратуре гибридно-интегральных конструкций на монокристаллические устройства. Такая замена обещала большие преимущества в быстродействии, массогабаритных показателях и других характеристиках радиоэлектронного вооружения.

Результатом программы MIMIC стало освоение в США производства GaAs СВЧ-микросхем с широко развитой инфраструктурой, обеспечивающей разработку материалов, подложек, масок, оборудования, средств измерения, проектирование схем и др. Этот промышленный потенциал стал основой рынка СВЧ-МИС, СВЧ-технологии. Были модернизированы системы управления огнем Longbow миллиметрового диапазона для РЛС ударных вертолетов и самоприцеливающиеся боевые элементы SADARM. Создана система связи в диапазоне 40–60 ГГц ЕНФ и создано оружие высокоточного наведения X-ROD (95 ГГц) и др.

Наибольшее применение GaAs СВЧ-МИС нашли в АФАР, требующих большого числа приемопередающих модулей. Важными параметрами таких модулей является выходная мощность и КПД, определяющие суммарную излучаемую решеткой мощность и конструктивные возможности отвода тепла. Модуль содержит несколько монокристаллических схем, в том числе микросхему выходного монокристаллического усилителя мощности. Импульсная мощность современной типичной GaAs МИС приемопередающего модуля АФАР X-диапазона (10 ГГц) составляет 10 Вт, средняя — 1–3 Вт. Конструкции АФАР на основе таких модулей ряда зарубежных фирм уже внедряются в новейшие системы вооружения.

Первые крупномасштабные применения монокристаллических схем, разработанных в рамках программы MIMIC, являются системы HARM (противорадиолокационная ракета) и COBRA (противоартиллерийская система РЛС с АФАР

С-диапазона).ППМ АФАР станции COBRA фирмы Electric Electronics Lab. содержал шесть GaAs МИС: предварительный усилитель, два мощных усилителя со сложением мощностей, фазовращатель, усилитель с регулируемым коэффициентом усиления и малошумящий усилитель. Очевидно, что производство МИС стимулировало отработку всего цикла операций технологического процесса: от проектирования МИС до их изготовления, тестирования, пайки и сборки модулей.

Сегодня РЛС с АФАР создаются для различных платформ: наземных, корабельных, самолетных, спутниковых, которые активно рекламируются в зарубежных источниках.

Таким образом, в направлениях указанных функциональных систем имеется возможность найти перспективное применение микроэлектроники для создания приемопередающих модулей для АФАР РЛС нового поколения военного назначения [5–10].

Другими возможными направлениями применения микро- и нанoeлектроники являются создание радиолокационных систем различного назначения и основных структур АФАР в микроэлектронном исполнении, в т.ч. с использованием МЭМС на основе GaN- и GaAs в структурах ППМ АФАР (антенные МЭМС с управляемыми линиями задержки и МЭМС-системы генерации и др.).

Также теоретические исследования показывают возможности создания малогабаритных антенн, обладающих свойствами, превосходящими известные фундаментальные ограничения при использовании известных излучателей, но конструктивная реализация антенных наносистем требует применения нанотехнологий.

Литература

1. Быстров Р.П., Гвоздев А.Е., Немцов А.В., Никитов С.А. Микро- и нанoeлектроника в системах радиолокации. Монография / Под ред. Р.П. Быстрова. — М.: Типография 3 ЦНИИ МО РФ. 2012. 234 с.
2. Баранов Н.А., Быстров Р.П., Гвоздев А.Е., Корниенко В.Н., Пожидаев В.Н., Немцов А.В. Возможности и особенности применения терагерцового диапазона радиоволн в высокоточных системах наведения. — М.: ФГБУ «3 ЦНИИ» Минобороны России. 2013. С. 357.
3. Быстров Р.П., Гуляев Ю.В., Гвоздев А.Е., Немцов А.В. Тенденции развития радиоэлектронных систем военного назначения. — М.: ФГБУ «3 ЦНИИ» Минобороны России. 2012. С. 312.
4. Видулов И. GaN-микросхемы приемопередающих модулей АФАР: европейские разработки // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7. С. 90–97.
5. Волков А.В., Гвоздев А.Е., Быстров Р.П., Немцов А.В. Микроэлектронное исполнение структур активных фазированных антенных решеток // Известия РАН. 2021. № 3 (118). С. 69–76.
6. Добычина Е.М. Цифровые антенные решетки радиоэлектронных бортовых систем: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.07 / Добычина Елена Михайловна. — М.: 2018. 294 с.
7. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. под редакцией д.ф.-м.н. А.Г. Васильева. — Москва: Техносфера. 2011. 592 с. ISBN 978-5-94836-296-0.
8. Балакирев А., Туркин А. Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике // Современная электроника. 2015. № 4. С. 28–32.
9. Фёдоров Ю. Широкозонные гетероструктуры (Al,Ga,In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // Электроника НТБ. 2011. № 2. С. 92–107.
10. Туркин А.Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. 2011. № 5. С. 6–10.