

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ С АФАР: НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

И. Викулов

УДК 621.396
БАК 05.12.00

Ускорившееся в последнее время развитие активных фазированных антенных решеток (АФАР) вызвано их быстрым внедрением в радиоэлектронные системы управления вооружением. Наличие АФАР не только повышает эффективность систем вооружения, но и в значительной степени определяет экспортный потенциал стран, участвующих в международной торговле вооружением. Так, например, РЛС современных истребителей ведущих промышленных стран оснащены АФАР, от характеристик которых во многом зависят функциональные возможности самолетов и заключение многомиллиардных контрактов на их продажи.

АФАР начали развиваться в 1960-е годы, когда американская компания Texas Instruments разработала первую такую решетку на основе кремниевых микросхем (МИС) по программе MERA (Molecular Electronics for Radar Applications) под эгидой американского оборонного агентства DARPA. Эта и последующие разработки не привели к широкому внедрению АФАР из-за их низкой энергоэффективности и высоких потерь кремниевых МИС на сверхвысоких частотах. Однако попытки построения АФАР не прекращались. В качестве мощных усилителей приемопередающих (ПП) модулей пробовали применять различные СВЧ-приборы, в частности электровакуумные. Например, в конструкцию РЛС известной корабельной системы ПРО "Иджис" (Aegis) 1980-х годов входила активная решетка, содержащая большое количество миниатюрных ЛБВ компании Varian. Позднее стали предлагать также компромиссные варианты, содержащие входной мало-мощный полупроводниковый усилитель и выходную мини-ЛБВ. Направление получило развитие как отдельный небольшой класс СВЧ-приборов – мощные СВЧ-модули, но не решило в целом задачу создания АФАР, в частности из-за проблем с питанием высоковольтных ЛБВ [1].

Основы технологии современных АФАР были заложены в конце 1980-х годов после прихода на смену кремнию, как базовому материалу СВЧ МИС, сложных полупроводниковых материалов группы A^3B^5 , в частности арсенида галлия (GaAs). В результате реализованных агентством DARPA программ: MIMIC (Microwave / Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuits program) и следующей за ней MAFET (Microwave Analog Front End Technology program) был совершен скачок от лабораторных образцов к промышленному производству надежных GaAs СВЧ МИС с уровнем мощности 1 Вт и более. В 2000-х годах началось активное внедрение GaAs СВЧ МИС в действующие системы вооружения США, первыми стали РЛС истребительной авиации и системы ПРО [2]. Одновременно не прекращалась подготовка новой полупроводниковой СВЧ-компонентной базы АФАР. В качестве полупроводникового материала СВЧ МИС для АФАР следующего поколения был выбран нитрид галлия (GaN), который превосходит GaAs по напряжению, тепловым характеристикам и энергоэффективности. Исследование GaN агентством DARPA выполнило в рамках программы по созданию технологии широкозонных полупроводников WBGs (Wide Bandgap Semiconductor Technology) [3, 4]. Однако технология нового материала оказалась настолько слож-

ной, что потребовалась еще одна программа, проведенная в соответствии с законодательным актом Defense Production Act Title III по отработке промышленного выпуска GaN СВЧ МИС [5]. В настоящее время степень готовности GaN-технологии в США полностью соответствует требованиям серийного военного производства. Это позволяет отказаться от использования GaAs в качестве базового материала МИС ПП-модулей для АФАР новых систем вооружения и заменить антенные GaAs-решетки в действующих системах на GaN-решетки.

АФАР радиоэлектронных систем – не только технологически сложные, но и очень затратные сооружения. Поэтому в последнее время одной из главных тенденций становятся поиски путей снижения их стоимости за счет упрощения методов конструирования и использования коммерческих технологий. Уже появились предложения о создании недорогих многофункциональных РЛС с АФАР, решающих задачи метеонаблюдения, управления воздушным движением, слежения за беспилотными объектами и др.

СИСТЕМЫ ВООРУЖЕНИЯ

Процесс модернизации радиоэлектронных систем управления вооружением на основе использования GaN-технологии в АФАР, начавшийся в США сразу по завершении программы WBSG, продолжается и в настоящее время и охватывает системы всех видов вооружений. Определенную активность проявляют и некоторые европейские страны.

Корабельные системы

Cobra Judy. Система, установленная на корабле типа T-AGM-25, предназначена для обнаружения и сбора данных о запусках баллистических ракет. В нее входят два радара S- и X-диапазона с массивными четырехърусными GaN АФАР, каждая из них весит более 500 тыс. фунтов (более двух тонн) и содержит около 20 тыс. ПП-модулей. Задача радара S-диапазона (разработка компании Northrop Grumman) – автономный поиск, захват и сопровождение интересующих объектов, а также первичный сбор данных о них. Радар X-диапазона (разработка компании Raytheon) выполняет аналогичные функции с более высоким разрешением в автоматическом режиме. Кроме того, антенны обоих радаров допускают механическое перемещение по азимуту и углу места, что повышает возможности системы в случае изменения положения корабля в морских условиях или изменения движения интересующих объектов.

Прежняя система Cobra Judy, работавшая с 1980-х годов, также имела два радара. Радар S-диапазона представлял собой пассивную антенную решетку на основе электровакуумного СВЧ-прибора, перемещающую только

по азимуту. В радаре X-диапазона использовалась параболическая антенна, которая позволяла вести сопровождение последовательно только одного выбранного объекта. Разработка и установка новой системы выполнены в рамках специальной программы Cobra Judy Replacement [6].

AMDR (Air and Missile Defense Radar). Система ПВО/ПРО, установленная на эсминцах класса Arleigh Burke, состоит из двух радаров S- и X-диапазонов с АФАР. В S-диапазоне осуществляются объемный поиск, сопровождение и классификация баллистических ракет. Радар X-диапазона выполняет поиск по горизонту, прецизионное сопровождение, обеспечивает связь с наводимой ракетой и подсветку цели на конечном участке траектории. Используется система модульной конструкции, которую легко можно изменять для кораблей различного типа и назначения [7]. Недавно модифицированный тип системы (SPY-3) установлен на стелс-эсминце класса Zumwalt варианта DDG-1000. В составе системы также два радара – S- и X-диапазонов. Радар X-диапазона, имеющий три антенных полотна и устройство адаптивного цифрового формирования луча, выполняет поиск по горизонту, число обрабатываемых целей и чувствительность системы повышены в 30 раз. Передающая часть с GaN АФАР на 34% дешевле по сравнению с GaAs-вариантом, а средняя наработка между отказами составляет 10^8 ч. Масштабируемая антенна состоит из сборных блоков размерами $2 \times 2 \times 2$ футов (примерно $60 \times 60 \times 60$ см). В каждый блок входят четыре заменяемых на месте субблока. Замена одного занимает не более 6 мин [8].

TRS-4D. Система, впервые представленная на Всемирной выставке вооружений DSEi 2011 году в Лондоне, предназначена для обнаружения, захвата и сопровождения всех типов морских и воздушных целей в автоматическом режиме. Выполняет функции самообороны и управления огнем, может работать совместно с авиацией. Диапазон частот GaN АФАР составляет 5–6 ГГц.

Технология АФАР позволяет повысить чувствительность системы и обнаруживать цели размерами $0,01 \text{ м}^2$ в течение примерно одной секунды.

Система была разработана европейской компанией Cassidian с фиксированной панелью АФАР и принята на вооружение фрегатов класса F-125 германских ВМС [9]. Недавно немецким отделением компании Airbus Defense and Space Inc. заключен контракт с американской службой береговой охраны на поставку версии системы TRS-D с вращающейся панелью АФАР для кораблей типа LCS17 и LCS19 [10]. Приемопередающие модули АФАР выпускает СВЧ-завод (Microwave Factory) в г. Ульм (Ulm, Германия), на котором трудятся более 200 человек.

Наземные системы

Patriot – одна из самых старых американских систем ПВО. ЗРК Patriot поступил на вооружение Армии США в 1984 году и прошел все стадии обновления входящей в его состав компонентной составляющей СВЧ-электроники. Первоначально в систему входила пассивная ФАР с электронным сканированием луча на основе вакуумного электронного прибора (ЛБВ). После успешного завершения программы развития технологии монолитных СВЧ-схем решетка станции была заменена активной ФАР на основе GaAs МИС СВЧ. В 2015 году компания Raytheon построила АФАР на основе GaN-микросхем и показала, что ее использование в качестве антенны заднего вида значительно расширяет зону обзора системы.

В состав системы входят две GaN АФАР: переднего вида шириной 9 футов (2,74 м) и высотой 13 футов (5,9 м), ориентированная на главную угрозу, и в четыре раза меньшая по площади антенна заднего вида. Вместе они обеспечивают непрерывный обзор пространства в 360° . В число возможных угроз, которым способна противостоять система, входят самолеты и беспилотники, крылатые и баллистические ракеты. К настоящему моменту система успешно отработала в течение 1000 ч (половина из намеченных программой испытаний). РЛС с АФАР на основе GaN-технологии имеет неплохие перспективы экспорта, поскольку система Patriot входит в состав ПВО 13 стран. 31 марта 2017 года Польша уже направила запрос на поставку этой системы. Свою заинтересованность выразила также Германия, заявив о соответствии характеристик системы требованиям, предъявляемым к собственной тактической системе ПВО/ПРО [11].

THAAD (Theatre High Altitude Area Defense). В 1992 году, сразу по окончании программы MIMIC, компания Lockheed Martin Missiles and Space получила от Агентства противоракетной обороны (MDA) США контракт на разработку мобильного комплекса противоракетной обороны THAAD. Комплекс предназначен

для поражения баллистических ракет (БР) как в верхних слоях атмосферы, так и за ее пределами. Субподрядчиком по разработке входящего в систему радара AN/TPY-2 с активной ФАР на основе GaAs СВЧ МИС выступает компания Raytheon. После проведения войсковых испытаний в 2008–2010 годах система была принята на вооружение. Радар AN/TPY-2 представляет собой транспортируемую РЛС X-диапазона, отдельные характеристики которой приведены в [2].

Первый контракт на модернизацию AN/TPY-2 путем замены GaAs СВЧ-электроники на GaN СВЧ-электронику компания Raytheon получила в октябре 2016 года, последний стоимостью 10 млн долл. – в апреле 2017-го. Замена GaAs на GaN увеличит дальность действия станции, повысит возможность обнаружения и распознавания целей. При этом возрастет надежность работы системы в целом без увеличения стоимости ее производства и обслуживания. По словам представителей компании, перевод системы на GaN-технологии даст возможность поражать любые классы баллистических ракет в экстремальных условиях оперативной обстановки.

Радар AN/TPY-2 работает по следующей схеме:

- **в начальной фазе** радар обнаруживает, сопровождает и классифицирует баллистические ракеты сразу после их запуска;
- **в конечной фазе** радар захватывает и ведет БР, далее на участке снижения ракеты система управления огнем дает команду на ликвидацию угрозы [12].

G/ATOR (Ground/Air Task-Oriented Radar).

В настоящее время компания Northrop Grumman выполняет заказ Корпуса морской пехоты США (USMC) по созданию шести радиолокационных систем AN/TPS-80 G/ATOR с АФАР на арсениде галлия. Первый образец планировался к поставке в феврале 2017 года. Недавно Northrop Grumman получила контракт от USMC на организацию начального малосерийного производства еще девяти систем G/ATOR, на этот раз на основе GaN-технологии АФАР в расчете на экономию стоимости эксплуатационного цикла в 2 млн долл. на каждую систему. Переход на GaN-технологии снизит потребляемую энергию, повысит КПД и выходную мощность станции. Это существенно увеличит дальность обнаружения и сопровождения целей для всех режимов работы: наблюдения за воздушным пространством, управления оружием, захвата контратакующих целей и управления воздушным трафиком. В компании Northrop Grumman считают, что G/ATOR – первая в Минобороны наземная радиолокационная система с АФАР, в которую вводится GaN-технология без остановки действующего производства систем [13].

LRDR (Long Range Discrimination Radar).

В 2015 году группа компаний во главе с Lockheed Martin получила заказ от Агентства MDA на разработку, соз-

дание и испытания системы LRDR. Контракт сроком на девять лет оценен в 784 млн долл. Система рассматривается как ключевой компонент наземной архитектуры ПРО США и предназначена для захвата, сопровождения, классификации и поражения баллистических ракет на максимальных дальностях. Входящая в состав радиолокационной системы LRDR АФАР работает в S-диапазоне и строится на основе GaN электронных компонентов. РЛС предыдущей конструкции работали на частоте 440 МГц, имели небольшую полосу частот и низкое разрешение боеголовок на фоне ложных целей. Тестирование системы планируется провести на базе ВВС США на Аляске в 2020 году [14].

Space Fence. Радиолокационная система S-диапазона, разрабатываемая компанией Lockheed Martin в интересах ВВС США, предназначена для наблюдения, обнаружения, сопровождения и точного измерения космических объектов, находящихся на низких околоземных орбитах. Система может собирать данные о более чем 500 тыс. объектов, таких как отработанные разгонные блоки ракет, остатки оборудования и другой космический мусор, находящийся в зонах, где работают орбитальные космические станции, аппараты системы GPS и другая полезная аппаратура. Система Space Fence имеет отдельные передающую и приемную ФАР, что позволяет значительно повысить излучаемую мощность, дальность и разрешающую способность системы. В состав передающей решетки входят 36 тыс. усилителей мощности (технология GaN-микросхем на SiC-подложках или GaN на SiC) разработки компании Wolfspeed (структурное подразделение компании Cree). Поставке усилителей предшествовали их ускоренные испытания на срок службы в течение более 5 000 ч (около семи месяцев). Испытания подтвердили их долговременную надежность с вероятностью 99%. Развертывание системы намечено на 2018 год на атолле Квад-жалейн Маршалльских островов [15].

Авиационно-космические системы

Next Generation Jammer (NGJ). Система NGJ, разрабатываемая компанией Raytheon, размещается в наружном контейнере самолета EA-18G Growler и предназначена для электронного подавления средств ПВО и систем связи (рис.1). Она заменит действующую тактическую систему РЭБ AN/ALQ-99, в конструкции которой использованы электровакуумные СВЧ-приборы. В системе используются активная ФАР на основе технологии GaN-компонентов, а также новейшая цифровая техника и программные средства. В апреле 2016 года состоялась процедура приемки очередного этапа разработки, в ходе которой признано соответствие станции графику работы и техническим характеристикам, предъявляемым к самолетам данного назначения. Оконча-



Рис.1. Тактическая система РЭБ с GaN АФАР для самолетов EA-18G Growler (Разработка компании Raytheon)

ние следующего этапа разработки, запланированного на середину 2017 года, будет означать переход к производственному выпуску системы [16].

Система РЛС/РЭБ компании Saab. В дни проведения выставки Aero India (в феврале 2017 года) индийская самолетостроительная корпорация Hindustan Aeronautics Ltd опубликовала запрос на поставку радара с АФАР и комплекса РЭБ для легкого самолета-истребителя Tejas Mk1A собственной разработки. Шведская компания Saab выразила готовность к поставке радиоэлектронного комплекса, включающего РЛС с АФАР, интегрированную с системой РЭБ. В конструкции АФАР использована технология GaN на SiC. РЛС обеспечивает оптимальные характеристики в условиях плотной электромагнитной обстановки при всех режимах работы: воздух – воздух, воздух – земля и воздух – море. Встроенная память позволяет записывать большое количество данных о выполненных полетах. Интеграция всех систем проведена с учетом требований к данному типу самолета по ограничению размеров, потребляемой энергии и охлаждению. Комплекс РЭБ содержит сенсоры и передатчики, гарантирующие своевременное оповещение о ситуации и самозащиту. Контейнер с комплексом РЭБ имеет небольшие размеры, малый вес и небольшое аэро-

динамическое сопротивление. Для передачи сигналов помех используется GaN АФАР. Компания Saab заявляет, что на компоненты системы не распространяются ограничения ИТАР, поскольку все они разработаны внутри самой компании. Передача технологии гарантирует индийской стороне организацию собственного производства, ремонт и дальнейшую модернизацию системы, так как все работы будут выполняться одновременно с разработкой аналогичной системы для собственного истребителя Gripen [17].

В США продолжают совершенствовать технологию GaN для использования в военных системах. В конце 2016 года Лаборатория ВВС и Управление министра обороны США выдали компании Raytheon дополнительный заказ объемом 14,9 млн долл. на работу по улучшению производства GaN монолитных интегральных схем и приборов. Контракт продолжает предыдущий этап отработки GaN-производства, предусмотренный программой Title III и выполненный в 2013 году. Цель работы – дальнейшее повышение характеристик, процента выхода годных и надежности мощных GaN СВЧ-приборов. Улучшенная производственная технология GaN будет использована в создаваемой Raytheon сводной авиационно-космической системе РЭБ следующего поколения Space and Airborn Systems Next Jammer, начало производства которой малой серией запланировано на 2018 год [18].

СИСТЕМЫ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Своему быстрому развитию системы с АФАР обязаны прежде всего военным применениям. В то же время в ряде коммерческих областей технология АФАР может быть использована в интересах гражданского населения. К ним относятся управление воздушным движением, служба метеонаблюдения, контроль за движением транспортных средств и летательных аппаратов без водителей и др. Однако построение радиоэлектронных систем с АФАР невоенного применения наталкивается на серьезные технические и экономические трудности, главная из них – стоимость АФАР.

Важный шаг в направлении уменьшения стоимости и упрощения конструирования АФАР сделало агентство DARPA, открыв в 2013 году программу Arrays at Commercial Timescale (ACT), направленную на сокращение цикла разработки и производства АФАР для следующего поколения РЛС, систем РЭБ и связи путем заимствования лучших коммерческих технологий. Компания Raytheon выступила со своей концепцией программы Rapid Array Performance Improvement and Deployment (RAPID), касающейся упрощения разработки, модернизации и развертывания активных фазированных решеток. Согласно этой концепции, АФАР предлагается создавать из отдельных строительных блоков, содержащих

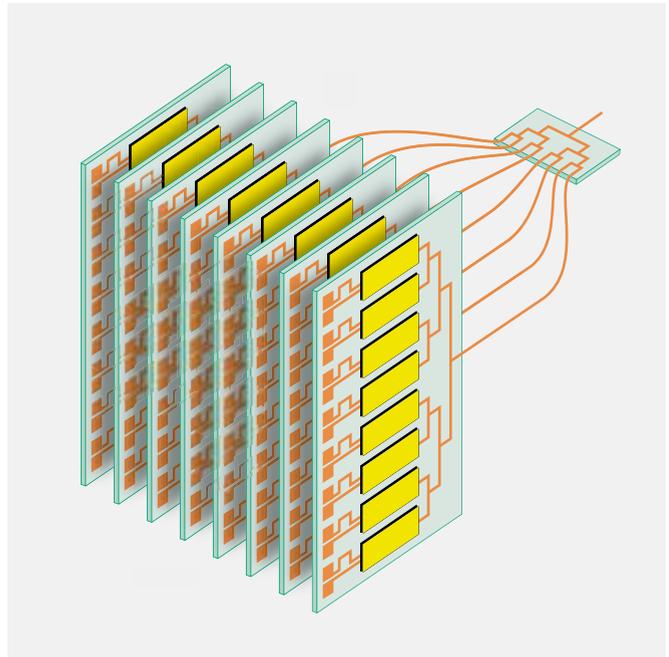


Рис.2. Slat-архитектура АФАР

общие модули с цифровым управлением и реконфигурируемые излучающие элементы. В этом случае любая крупная система с АФАР может быть быстро построена с учетом конкретного применения и не потребует отдельной разработки [19].

Свой подход к решению задачи снижения стоимости предлагает также компания MACOM [20], которая владеет технологией GaN и GaAs СВЧ-микросхем, оптических и световых приборов и ориентирована на коммерческие рынки. По оценке MACOM, примерно половина стоимости АФАР приходится на ПП-модули, в которых используются СВЧ-микросхемы и керамические материалы, сложные процессы сборки и соединения кристаллов. Для сокращения стоимости ПП-модулей компания MACOM предлагает применять автоматизированные методы сборки микросхем в корпуса, используемые в коммерческом электронном производстве. При этом компоненты модуля помещаются в плоские пластиковые корпуса типа QFN без выводов и затем напаиваются на недорогую технологическую подложку. Обычно в архитектуре больших АФАР платы для монтажа ПП-модулей ориентированы перпендикулярно полотну антенны, так называемая slat-архитектура (рис.2). За ними располагается большое количество вспомогательных схем, кабелей и соединителей, обеспечивающих ввод и вывод ВЧ-сигналов, сигналов управления и питания. На эти элементы приходится также почти половина стоимости решетки (сборка и тестирование структуры занимает около 10% стоимости). Для снижения данной части стоимости решетки MACOM вместо принятой slat-архитектуры предлагает исполь-

зовать tile-архитектуру, при которой платы для монтажа ПП-модулей располагаются параллельно антенному полотну (рис.3). Главная строительная ячейка такой АФАР выполняется в виде многослойной структуры в форме плитки (tile), состоящей из двух плат – лицевой и обратной (рис.4). В состав лицевой платы входит апертурная плата с интегрированными излучающими элементами, схемами формирования луча, питания и распределительной логики. К ее обратной стороне припаивается недорогая подложка с ПП-модулями, собранными по технологии поверхностного монтажа. Обратная плата включает схемы питания по постоянному току, процессоры общего назначения и схемы высокой логики. Надежное взаимное соединение двух основных плат осуществляется с помощью простой механической конструкции. Контакт по высокой частоте и постоянному току между двумя основными платами достигается с помощью металлических контактных площадок, расположенных по периметру плат. Такая конструкция значительно уменьшает объем, исключает кабели и соединители, подводящие ВЧ и питание к ПП-модулям. По оценке МАСОМ, предлагаемая архитектура построения АФАР позволяет снизить стоимость излучаемой мощности в расчете на единицу площади решетки в пять раз.

Работу по созданию коммерческих АФАР компания МАСОМ проводит совместно с Лабораторией Линкольна

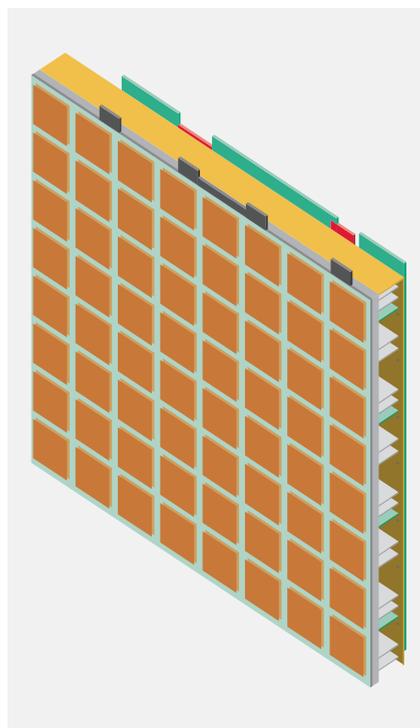


Рис.3.
Tile-архитектура
АФАР

Массачусетского Технологического Института (MIT LL), которая отвечает за построение многофункциональных РЛС с АФАР (Multifunctional Phased Radar, MPAR). Финан-

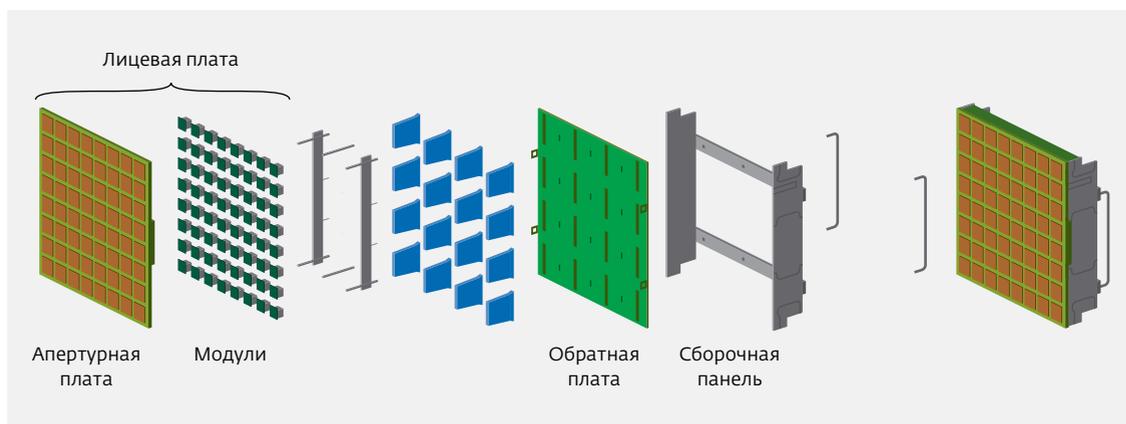


Рис.4.
Структура
ячейки АФАР
компания
MACOM

сируют работу Федеральное авиационное агентство (FAA) США и Национальная администрация по океану и атмосфере (NOAA). Используя технологию компании MACOM, Лаборатория MIT LL рассчитывает также включиться в программу АСТ агентства DARPA. Первые испытания радара MPAR в качестве метео-РЛС, проведенные в 2015 году, подтверждены данными Национальной лаборатории прогнозирования штормов. В дальнейшем MACOM поставила для MIT LL решетку, собранную из 2×5 tile-ячеек, каждая размером 16×16 дюймов (примерно 40×40 см), для подготовки РЛС слежения за движением самолетов, сейчас она используется Управлением NOAA [20]. Над разработкой технологии многослойных ячеек компания MACOM работает около десяти лет, на данный момент ее технологическая и производственная готовность к их выпуску оценивается на уровне соответственно TRL-8 и MRL-8 (наивысший уровень – 10).

Построенная по технологии tile-ячеек решетка обладает рядом дополнительных преимуществ по сравнению с ФАР обычной конструкции. В частности, в ней возможны двойная поляризация луча и выделение отдельных подрешеток с узкими лучами для более точного сканирования. Это расширяет функции системы – можно совмещать наблюдение за погодой и слежение за воздушным транспортом на расстоянии до 260 миль.

Сейчас по заказу FAA/NOAA создается крупная радиолокационная система MPAR, для которой уже построено более 90 ячеек и испытано свыше 6000 ПП-модулей. По результатам испытаний ожидается принятие решения о начале к 2020 году производства партии из 365 многофункциональных РЛС, которые заменят действующие в США отдельно 200 станций наблюдения за погодой и 350 станций управления воздушным движением. Ожидаемый экономический эффект может составить около 5 млрд долл. От компании MACOM это потребует выпуска около 26 тыс. ячеек в год. Разрабатываемые станции работают в S-диапазоне, но MACOM уже начала исследования для продвижения своей техно-

логии в более высокочастотные K_u - и K_a -диапазоны. Это потребует плотной интеграции компонентов в ячейке антенны, создания миниатюрных корпусов и решения дополнительных тепловых проблем.

Недавно компанией MACOM заключено партнерское соглашение с компанией Northrop Grumman о совместной разработке и производстве радиолокационных решеток по технологии MACOM для широкого круга военных программ и вооружений. Соглашение определяет компанию MACOM как эксклюзивного поставщика своей технологии антенн, хотя и допускает использование в составе ячеек собственных СВЧ и цифровых компонентов компании Northrop Grumman. Партнерство с Northrop Grumman – одной из крупнейших военно-промышленных компаний – может дать сильный толчок развитию tile-технологии АФАР, но, скорее всего, уменьшит объем работ самой компании MACOM по гражданской тематике.

Начало 2000-х годов отмечено широким внедрением активных фазированных решеток в военную радиоэлектронику. Основой столь быстрого развития АФАР стали реализованные за рубежом специальные программы исследования сложных полупроводников (GaAs, GaN, SiC и др.), которые обеспечили создание современной электронной СВЧ-компонентой базы АФАР. Эволюция полупроводникового материаловедения в этот период в России показана в [22]. За последние полтора десятилетия за рубежом дважды проводилась модернизация систем радиооружия с АФАР: сначала на основе арсенида галлия, а в последнее время на основе нитрида галлия.

Нитрид галлия приобрел стратегическое значение не только в строительстве АФАР, но и в других областях: силовой электронике, оптоэлектронике, лазерной технике и др. Поэтому страны, обладающие GaN-технологией, не заинтересованы в ее распространении. Так, в конце 2016 года по прямому указанию Президента США была заблокирована покупка контрольного пакета акций немецкой компании Aixtron (производителя оборудования для осаждения GaN эпитаксиальных пленок) круп-

нейшему китайскому инвестиционному фонду в области чип-технологии [23]. Совсем недавно Комитетом по иностранным инвестициям США остановлена практически завершённая покупка немецкой компанией Infineon американской компании Wolfspeed – производителя мощных GaN на SiC СВЧ-микросхем для АФАР [24, 25].

Сдерживающим фактором дальнейшего ускоренного развития АФАР является их стоимость. За рубежом начали действовать специальные программы, предлагающие новые конструктивные методы построения АФАР с использованием коммерческих технологий массового электронного производства. Эти программы создают основу для быстрой и экономически эффективной разработки нового поколения радиоэлектронных систем с АФАР с гибкой архитектурой, легко трансформируемой для военного, гражданского и коммерческого применения.

Автор признателен Н.А.Кичаевой за полезное обсуждение и техническую поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Викулов И., Кичаева Н.** Мощные СВЧ-модули. Гибрид вакуумной и твердотельной электроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 7. С. 69–71.
2. **Викулов И., Кичаева Н.** Технология GaAs монолитных схем СВЧ в зарубежной военной технике // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 2. С. 56–61.
3. **Викулов И., Кичаева Н.** GaN-технология. Новый этап развития СВЧ-микросхем // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 4. С. 80–85.
4. **Викулов И.** Программа WBGs-RF. Фаза II, итоги и намерения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 8. С. 62–65.
5. **Викулов И.** GaN-микросхемы претендуют на замену ЭВП // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 1. С. 168–175.
6. **Washburn D., Risas W.** Cobra Judy Replacement: The Legacy Continues // Microwaves&RF. 2011. Vol. 50. № 12. P. 136–139.
7. **Masse D.** Raytheon to Design Technology Demonstrator for Air and Missile Defense // Radar, Microwave Journal. 2010. Vol. 53. № 11. P. 39.
8. **Brookner E.** Radar and Phased Array Breakthroughs // Microwave Journal. 2015. Vol. 58. № 11. P. 20–36.
9. Microwave Journal. 2011. Vol. 54. October 6.
10. **Drubin C.** TRS-4D AESA Radars for Freedom Variant LCS // Microwave Journal. 2017. Vol. 60. № 1. P. 37.
11. Raytheon's GaN-based AESA Patriot air & missile defense radar completes key milestones. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2016/feb/raytheon_030216.shtml
12. Raytheon awarded \$10m MDA contract to upgrade X-band ballistic missile defense radar to GaN. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/apr/raytheon_070417.shtml
13. Northrop Grumman awarded contract for nine GaN G/ATOR systems // Microwave Journal. 2016. September 8.
14. Lockheed Martin Inks Defense Radar LRDR // Microwaves&RF. 2015. October 28.
15. Wolfspeed's GaN high-power amplifiers meet long-term reliability goals for Lockheed Martin's Space Fence program. http://www.semiconductor-today.com/items/2015/oct/wolfspeed_271015.shtml.
16. Next Generation Jammer Inc 1 approved to enter the EMD phase // Microwave Journal. 2016. April 8.
17. Saab Offering GaN-Based AESA Radar and EW Systems for Indian Tejas LCA Fighter // Microwave Journal. 2017. February 21.
18. Raytheon Enhances GaN for the USAF // Microwaves & RF. 2016. November 9.
19. DARPA Throws Support Behind Upgradeable Radar // Microwaves & RF. 2015. April 3.
20. **Carlson D.** Tile Arrays Accelerate the Evolution to Next-Generation Radar // Microwave Journal. 2017. January. P. 22.
21. **Anwar A.** MACOM Builds Momentum behind Commercial Scale AESA Capabilities // Microwave Journal. 2016. March 14.
22. **Наумов А.** Метод создания мира. К 100-летию открытия метода Чохральского и 60-летию получения первого кристалла германия в России // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 9. С. 157–167.
23. President Obama Blocks Aixtron Takeover. <http://www.compoundsemiconductor.net/article/100661-President-Obama-blocks-Aixtron-takeover.html>
24. **Викулов И.** Технологическая база GaN СВЧ-электроники: компании, процессы, возможности // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 1. С. 106–115.
25. Cree terminates sale of Wolfspeed to Infineon following CFIUS' national security concerns. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/feb/cree-infineon_170217.shtml