

УДК: 623; 624.3; 049.77

DOI: 10.53816/20753608_2021_3_69

**МИКРОЭЛЕКТРОННОЕ ИСПОЛНЕНИЕ СТРУКТУР
АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК**
**MICROELECTROELECTRONIC EXECUTION OF STRUCTURES
OF THE ACTIVE PHASED ANTENNA LATTICES**

По представлению академика РАН В.В. Панова

*А.В. Волков, А.Е. Гвоздев, **Р.П. Быстров**, А.В. Немцов*

3 ЦНИИ МО РФ

*A.V. Volkov, A.E. Gvozdev, **R.P. Bystrov**, A.V. Nemtsov*

В статье на основе зарубежных и отечественных источников рассматриваются возможные направления применения микро- и нанoeлектроники для создания активных фазированных антенных решеток (АФАР). Приводятся результаты анализа применения конкретных функциональных схем антенных систем, которые могут реализовываться в перспективных АФАР и показано, какие конкретные микро- и наноструктуры могут применяться при создании антенн. Отмечается, что в основном найдут применение структуры микроэлектромеханических систем (МЭМС) и композитные материалы, а для создания отдельных элементов АФАР, таких как генераторы — приемо-передающие модули (ППМ). Успешное применение могут найти структуры на основе арсенида галлия GaAs. Приводятся результаты обоснования теоретической возможности создания антенных систем с высокими показателями по диаграммам направленности и коэффициенту усиления антенных систем.

Ключевые слова: микро- и наноматериалы, антенна, фазированная решетка, приемо-передающий модуль, диаграмма направленности, коэффициент усиления антенны.

In article generally on the basis of foreign and domestic materials the possible directions of application micro- and a nanoelectronics for creation of the phased antenna lattices (AFAR) are considered. Results of the analysis of application of concrete function charts of antenna systems which can be implemented in perspective AFAR are given. Are shown what concrete micro- and nanostructures can be applied at creation of antennas. It is noted that generally will find application of structure of microelectromechanical systems (MEMS) and composite materials and for creation of the AFAR separate elements as generators — the send-receive modules (SRM), successful application can find structures on GaAs gallium arsenide. Results of justification of theoretical possibility of creation of antenna systems with high rates according to directional patterns and coefficient of strengthening of antenna systems are given.

Keywords: micro- and nanomaterials, the antenna, the phased lattice, the send-receive module, the directional pattern, coefficient of strengthening of the antenna.

При реализации проектов с применением нанотехнологий в радиолокационных системах наиболее значимым направлением, связанным с развитием и применением микро- и наноэлектроники в РЛС, в настоящее время является создание эффективных антенных систем.

Выбор антенной системы (ФАР и АФАР) зависит от назначения и базирования (наземного, воздушного и космического) РЛС.

Бортовые РЛС истребителей — наиболее проблемная область использования АФАР, так как требуется реализовать активную решетку в малых массогабаритах. Это приводит к высокой плотности упаковки модулей и к ограничениям по возможностям охлаждения передающих систем.

Совершенно другая ситуация с наземными или крупными корабельными системами, где применение АФАР является фактическим стандартом, что обуславливается другими уровнями мощностей, другими габаритами и условиями эксплуатации, другими частотными диапазонами.

В целом применение нанотехнологий зависит от практического назначения антенны, а также от особенностей (достоинств и недостатков) АФАР, которые приведены далее.

Достоинствами АФАР являются:

- потенциально большая эквивалентная чувствительность приемопередающих модулей (ППМ);

- значительно большая достижимая мощность излучения, определяемая электрической прочностью элементов фидерного тракта;

- возможность амплитудно-фазового управления диаграммы направленности.

Недостатки:

- сравнительно большая цена;

- сложность в охлаждении модулей при значительном их количестве, большой единичной мощности и плотной компоновке;

- значительные сложности обеспечения зоны обзора, большей чем сектор сканирования, а он обычно не превышает 120 градусов без существенного падения характеристик;

- проблемы со стабильностью характеристик, вследствие этого, необходимость регулярных калибровок;

- значительный вес самой антенной системы (для истребителя — проблемы с развесовкой).

Поэтому вопрос, в какой антенной системе в первую очередь применять нанотехнологии, — риторический. Ответ: в обеих системах.

В рамках программы DARPA по материалам иностранной печати приводятся исследования по практическому применению микросистемной техники, теплоотводящих и радиопоглощающих наноматериалов, а также монолитных интегральных схем и элементов МЭМС для радиолокационных систем.

Поскольку в статье основной задачей является рассмотрение возможностей применения микро- и наноэлектроники для создания АФАР, то далее целесообразно показать, в каких же конкретно функциональных системах и устройствах микро- и нанотехнологии могут реализовываться. Далее рассмотрим следующие основные направления применения микро- и наносистем в АФАР:

- использование МЭМС в структурах АФАР (антенные МЭМС с управляемыми линиями задержки и МЭМС — системы генерации); АФАР на арсениде галлия (GaAs);

- увеличение направленности электрически малых антенн на основе композиционных материалов;

- наноантенны на базе резонаторно-щелевого сферического излучателя.

1. Использование МЭМС в структурах АФАР

Наиболее известными и важными в настоящее время направлениями исследований, проводимыми за рубежом и в отечественных теоретических и экспериментальных работах, являются решения задач создания АФАР на МЭМС, в том числе создания систем генерации на МЭМС, а также антенных систем на базе МЭМС с управляемыми линиями задержки.

Исследования по использованию МЭМС в антенных системах на протяжении последних 20-ти лет проводятся очень интенсивно [1]. МЭМС-технология применяется и для создания вибрирующих колебательных систем, используемых для формирования колебаний со стабильной частотой, которые находят широкое применение в разработке МЭМС-генераторов. При этом особо интересны поликремниевые резонаторы, изготавливаемые по стандартной полупроводниковой технологии. В управляемых по частоте генераторах с диэлектрическими

резонаторами широко используются перестраиваемые МЭМС-индуктивности или емкости. В табл. 1 представлены параметры некоторых моделей МЭМС-генераторов.

Сотрудники Мичиганского университета разработали колебательные поликремниевые микромеханические кольцевые резонаторы в форме бокала [2]. Их достоинство — меньший, чем у обычных диэлектрических резонаторов, импеданс. Была продемонстрирована работа таких резонаторов на частоте 828 МГц. При этом их добротность превысила 2200 как в воздухе, так и в вакууме. На частоте 426 МГц измеренная добротность в вакууме достигла 7700.

Весьма перспективны МЭМС-генераторы для замены в портативных системах кварцевых генераторов со средней стабильностью частоты и небольшим сроком службы. Корпорация

Discera Micro Communication Technologies начала выпускать генераторы типа MRO-100 на частоту 19,2 МГц, предназначенные для замены кварцевых генераторов в сотовых телефонах, что предполагает массовый объем производства этих устройств.

МЭМС-генераторы с механическими вибрирующими резонаторами выпускаются уже несколько лет. Однако широкого распространения они не получили. Причины: сравнительно высокий температурный коэффициент, равный $30 \cdot 10^{-4} \text{ \%}/^\circ\text{C}$ необходимость применения сложных схем температурной компенсации, а также дорогостоящих металлических или керамических корпусов для их герметизации.

Измеренная долговременная относительная нестабильность частоты новых генераторов компании SiTime составляет $0,05 \cdot 10^{-6}$ против $3 \cdot 10^6$

Таблица 1

Характеристики МЭМС-генераторов

Компания (сайт). Модель	f , МГц	V_y , В	Габариты, мм
Ecliptek (www.ecliptek.com) EMK11	1–125	1,8	0,85×7×5
Ecliptek (www.ecliptek.com) EMK43	1–125	1,8	2×2,5×0,85
SiTime (www.SiTime.com) SiT8002	1–125	2,5	0,85×3,2×2,5
SiTime (www.SiTime.com) SiT11XX	1–125	3,3	0,85×2,5×2

Примечание: V_y — напряжение питания

Таблица 2

Характеристики кварцевых, кремниевых МЭМС и MEMS First генераторов

Параметр	Тип резонатора		
	кварцевый	МЭМС	MEMS First
Размер, мм	2–5	0,3	0,3
Частота, МГц	30	> 100	>100
Долговременная стабильность, 10^{-6}	3	30–100	0,05
Компенсированный температурный дрейф, 10^{-6}	1–100	> 100	20–100
Добротность	$1-2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$	$75 \cdot 10^3$
Ударо/вибропрочность, 10^{-6} при 100 g	$\pm 2-10$	$\pm 0,2-1,0$	Ведутся испытания
Возможность интеграции с КМОП микросхемами	–	+	+
Корпус	Керамический	Керамический	Пластмассовый

для кварцевых, и $100 \cdot 10^6$ — для других типов кремниевых МЭМС-генераторов (табл. 2).

Выращенные поверх резонаторов поликремниевые «колпаки» выдерживают развиваемое при формовании пластмассового корпуса давление в 100 атмосфер. Это позволяет монтировать генераторы серий SiT11XX и SiT8002 на частоту от 1 до 125 МГц в стандартные корпуса типа QFN размером $2,0 \times 2,5$; $2,5 \times 3,2$ и $3,2 \times 5,0$ мм (толщина корпуса для всех вариантов — 0,85 мм).

Таким образом, важное достоинство МЭМС-технологии — это возможность изготовления микроэлектромеханических устройств на одном кремниевом кристалле с различными полупроводниковыми приборами по КМОП- и SiGe-технологии, а также на GaAs, GaN-пластинах и подложках из других материалов.

По мнению многих специалистов, МЭМС-узлы приближают возможность создания следующего поколения радиоэлектронных устройств субмиллиметрового диапазона не за счет соединения готовых функциональных узлов и компонентов, а путем их выращивания по единой технологии.

Уже в начале 80-х годов прошлого века было ясно, что благодаря высокой подвижности электронов и возможности получения материала с полуизолирующими свойствами, арсенид галлия более перспективен для создания СВЧ-устройств, чем кремний.

Выбор арсенида галлия обусловлен возможностью изготовления арсенидо-галлиевых 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 открыла программу 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 монолитные устройства. Такая замена обещала

большие преимущества в быстродействии, массогабаритных показателях и других характеристиках радиоэлектронного вооружения.

В результате программы MIMIC в США освоено производство GaAs СВЧ-микросхем с широко развитой инфраструктурой, обеспечивающей разработку материалов, подложек, масок, оборудования, средств измерения, проектирования схем и др. Этот промышленный потенциал стал основой рынка СВЧ-монолитных интегральных систем (МИС), СВЧ-технологии и позволил:

модернизировать системы управления огнем Longbow MM диапазона для РЛС ударных вертолетов;

создать самоприцеливающиеся боевые элементы SADARM;

создать систему связи в диапазоне 40–60 ГГц EHF;

создать 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 являются выходная мощность и КПД, определяющие суммарную излучаемую решеткой мощность и конструктивные возможности отвода тепла. Модуль содержит несколько монолитных схем, в том числе микросхему выходного монолитного усилителя мощности. Импульсная мощность современной типичной GaAs МИС приемопередающего модуля АФАР X-диапазона (10 ГГц) составляет 10 Вт, средняя — 1–3 Вт [3]. Конструкции АФАР на основе таких модулей ряда зарубежных фирм уже начали внедряться в новейшие системы вооружения.

Первые крупномасштабные применения монолитных схем, разработанных в рамках программы MIMIC, были осуществлены в системах HARM (противорадиолокационная ракета) и COBRA (противоартиллерийская система РЛС с АФАР С-диапазона). Приемопередающий модуль 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 маломушящий усилитель.

Производство МИС стимулировало отработку всего цикла операций технологического про-

цесса: от проектирования МИС до их изготовления, тестирования, пайки и сборки модулей.

Сегодня РЛС с АФАР создаются для различных платформ: наземных, корабельных, самолетных, спутниковых. Рассмотрим несколько примеров бортовых и наземных систем, которые активно рекламируются в зарубежных источниках [4].

Использование в радиолокации технологии монолитных схем позволяет разработчикам радиоаппаратуры полностью исключить не только антенные системы, но даже ламповые СВЧ-передатчики со всеми сопутствующими их проблемами. Очевидно, что и в дальнейшем эта тенденция будет усиливаться, поскольку технология СВЧ-МИС продолжает быстро развиваться. Так, недавно американская компания M/A-COM сообщила об освоении серийного выпуска GaAs монолитного усилителя 10-ГГц диапазона с КПД 30%, полосой 30% и выходной мощностью 20 Вт, что вдвое превышает достигнутый ранее уровень выходной мощности. Такие выводы подтверждаются тем, что DARPA объявила об исследованиях программы Wide Band-Gap Semiconductor Technology Initiative (WBGSTI), цель которой доказать возможность изготовления недорогих надежных GaN МИС и их применение в различных типах модулей. Для конкретной отработки намечены три типа модулей: приемопередатчик X-диапазона для РЛС, широкополосный усилитель мощности для систем электронного противодействия и усилитель мощности ММ диапазона для систем космической связи.

Параметры этих модулей (табл. 3) по уровню мощности, КПД и диапазону частот намного превосходят результаты, полученные для GaAs МИС в рамках программы MIMIC и последующих работ.

По заявлению руководителей программы WBGSTI, ее реализация позволит значительно улучшить характеристики военных систем, в том числе РЛС, высокоточного оружия, систем электронного противодействия и связи. Планируется также широко применять эти приборы и МИС в устройствах гражданского назначения.

Известно, что период между разработкой новой технологии и внедрением ее в системы всегда довольно длителен. DARPA поставила задачу сократить его в ходе реализации так называемой программы WBGSTI. С этой целью все участники программы уже на ее третьей фазе должны подготовить бизнес-планы ускоренного внедрения своих изделий в конкретные системы, где особое внимание уделяется их использованию для АФАР. Таким образом, МЭМС структуры, GaN-приборы и МИС, созданные в рамках программы WBGSTI, найдут широкое применение в современных радиолокационных и перспективных радиотехнических системах.

Зарубежные образцы АФАР с использованием МЭМС структур

Среди зарубежных образцов с АФАР, где используются микро- и наноструктуры, представляют интерес следующие образцы и фирмы-разработчики.

1. США. РЛС AN/APG-79 (фирма Raytheon). Разработка станции началась в 2000 году. Сейчас она устанавливается на всех истребителях F/A-18E/F Super Hornet ВМС США (рис. 1).

В 2005 году фирма Raytheon выиграла пятилетний контракт на поставку фирме Boeing 190 РЛС APG-79 с АФАР. Фирма владеет всеми технологическими процессами, необходимыми для создания современных GaAs МИС на MESFET.

Таблица 3

Параметры модулей по уровню мощности, КРД и диапазон частот

Тип модуля	Рабочая частота, ГГц	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Коэффициент усиления, дБ	Основная фирма-разработчик
Приемопередатчик для РЛС	8–12	60	35	18–20	Raytheon
Широкополосный усилитель для РЭБ	2–20	100	20	30	Northrop Grumman
Усилитель мощности для системы связи Q-диапазона	> 40	20	30	13	TriQuint

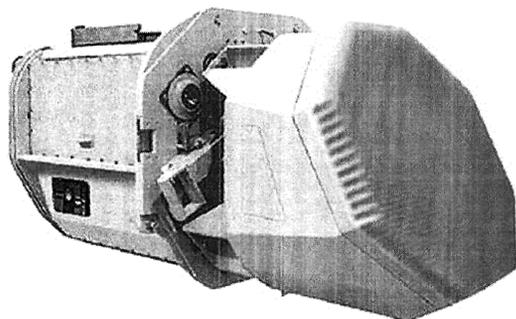


Рис. 1. РЛС AN/APG фирмы Raytheon для самолетов F/A-18E/F

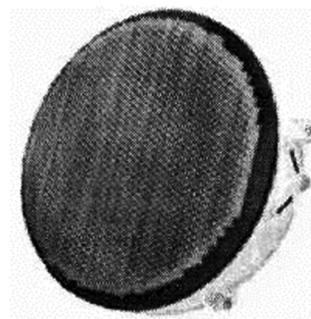


Рис. 2. АФАР РЛС APG-81 для истребителя F-35

РНЕМТ (псевдоморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов), E/D РНЕМТ (псевдоморфные транзисторы НЕМТ, работающие в режиме обогащения/обеднения).

Аналогичная РЛС с АФАР типа APG-81 (рис. 2) для перспективного истребителя F-35 разработана компанией Northrop Grumman [4].

В последнее время за рубежом уделяется большое внимание беспилотным самолетам-разведчикам. DARPA проводит две большие программы по созданию таких самолетов типа X-45 (фирма Boeing) и X-47 (Northrop Grumman). Объем финансирования каждой около 1 млрд долл. В проектах предусмотрено применение АФАР на основе GaAs приемо-передающих модулей, аналогичных используемым в РЛС APG-79. За разработку антенной технологии для этих программ отвечает фирма Raytheon.

2. Европа. В Европе в 1993 году начата совместная англо-французская программа разработки бортовой многофункциональной РЛС с АФАР на базе твердотельной электроники (Airborne Multiroie Solid State Active Array Radar, AMSAR). Цель программы — создание борто-

вой РЛС с АФАР для самолета Tiphoon. Общий вид станции показан на рис. 3, приемопередающий модуль этой станции — на рис. 4, а.

Монолитные схемы и модули на основе GaAs гетероструктурных биполярных транзисторов (НВТ) разрабатывает компания UMS. Специалистами создан монолитный выходной усилитель мощности модуля АФАР (рис. 4, б) со следующими параметрами:

– выходная мощность 10 Вт;

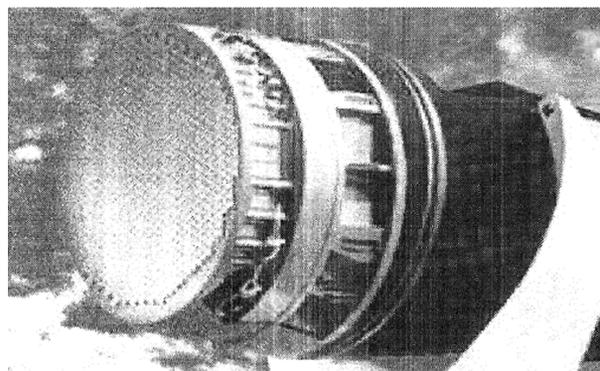
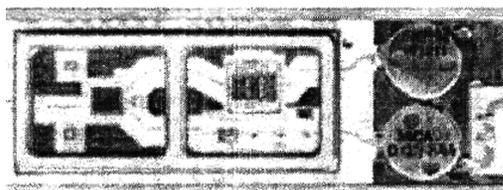
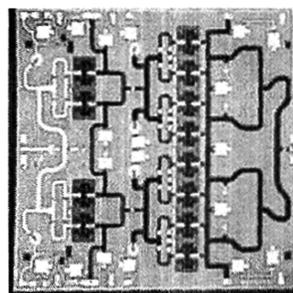


Рис. 3. РЛС AMSAR для европейского истребителя Tiphoon



а



б

Рис. 4. Образцы модулей АФАР РЛС AMSAR:
а — ППМ; б — монолитная схема выходного усилителя мощности

- коэффициент усиления 18 дБ на 10 ГГц;
- КПД > 35 % на 10 ГГц;
- размер кристалла $\times 4,74 \times 4,36 \times 0,1$ мм.

Уровень развития арсенид-галлиевой технологии британской фирмы Filtronic позволяет выпускать в год более 100 тыс. надежных и доступных по стоимости приемопередающих модулей на базе GaAs РНЕМТ транзисторов для бортовых АФАР.

Рассмотренные GaAs-МИС и модули для самолетных РЛС с АФАР лишь часть широкого фронта работ, проводимых за рубежом в этом направлении.

2. Методы увеличения направленности электрически малых антенн на основе композиционных материалов

Композиционные материалы представляют собой металлические и неметаллические матрицы (основы) с заданным распределением в них упрочнителей (волокон, дисперсных частиц и др.); при этом эффективно используются индивидуальные свойства составляющих композиции. По характеру структуры композиционные материалы подразделяются на нанокomпозиты, углеродные волокна, жидкие кристаллы, нитевидные кристаллы, волокнисто-игольчатые и др. [1].

Другими словами, композиционный материал — это искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с четкой границей раздела между ними. В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты можно разделить на матрицу и включенные в нее армирующие элементы. В композитах конструкционного назначения армирующие элементы обычно обеспечивают необходимые механические характеристики материала (прочность, жесткость и т.д.), а матрица (или связующее) обеспечивает совместную работу армирующих элементов и защиту их от механических повреждений и агрессивной химической среды в РЛС [1].

Как показывает практика? в РЛС находят применение волокнистые композиционные материалы, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами, в которых армирующие элементы несут основную нагрузку, тогда как матрица передает напряжения волокнам. Волокнистые материалы, как пра-

вило, анизотропны. Механические свойства их определяются не только свойствами самих волокон, но и их ориентацией, объемным содержанием, способностью матрицы передавать волокнам приложенную нагрузку и др. Диаметр непрерывных волокон, например, углерода, бора, а также тугоплавких соединений (B₄C, SiC и др.) обычно составляет 100–150 мкм.

В работах [1, 4] подробно описываются нанотехнологии для антенных систем РЛС и как применение таких материалов в РЛС позволяет достигать:

1. Уменьшения размеров антенн и существенного увеличения направленности излучения при заданных размерах излучателей, что является исторически ключевой проблемой теории и техники антенн. Способ решения задачи сверхнаправленного излучения, который заключается в создании резко неравномерного амплитудного и фазового распределения возбуждающих токов в антенне, является весьма проблематичным. Экстремально высокие амплитуды токов, скачки фазы и большой объем реактивной энергии вблизи антенны (stored energy) — причины весьма узкой частотной полосы, жестких требований к допускам на изготовление элементов конструкций, что и делает создание таких антенн весьма трудным.

2. Принципиальной возможности решения задачи сверхнаправленности (появилась после создания искусственных диэлектриков с уникальными электрофизическими характеристиками (ϵ , μ) — метаматериалов (MTM).

Создано несколько разновидностей метаматериалов при стандартных диэлектриках:

- дважды отрицательные (DNG — $\epsilon < 0$, $\mu < 0$);
- эпсилон-отрицательные (ENG — $\epsilon < 0$, $\mu > 0$);
- мю-отрицательные (MNG — $\epsilon > 0$, $\mu < 0$);
- дважды положительные (DPS — $\epsilon > 0$, $\mu > 0$).

Таким образом, открывается принципиальная возможность решения задачи сверхнаправленности. Дополнительно использование метаматериалов дает возможность формировать многопестковую диаграмму направленности и менять поляризацию излученного поля малых антенн.

Комбинации используемых материалов: DNG-DPS, ENG-DPS, MNG-DPS, — позволяют выявлять дополнительные возможности вариантов структур.

Успехи в области современных технологий изготовления материалов связаны с использованием новых и максимально «чистых» компонентов.

Такие материалы обладают уникальными электрофизическими свойствами. За новыми материалами закрепилось несколько названий: *left-handed materials* (LHM), материалы с дважды отрицательным коэффициентом рефракции *double negative media* (DNGM). Традиционные магнетодиэлектрики называют иногда *right-handed materials* (RHM).

Анализ иностранных и отечественных материалов показал, что в интересах создания перспективных ФАР огромное значение уделяется следующим вопросам:

– возможным направлениям применения микро- и нанoeлектроники в создании радиолокационных систем различного назначения и основных структур АФАР в микроэлектронном исполнении, в т.ч. использование МЭМС и на основе GaAs в структурах АФАР (антенные МЭМС с управляемыми линиями задержки и МЭМС-системы генерации и др.);

– обоснованию теоретической возможности создания малогабаритных антенн — нано-антенн, обладающих свойствами, превосходящими известные фундаментальные ограничения при использовании известных излучателей и поскольку речь идет все же о наноустройствах, то конструктивная реализация антенных наносистем требует применения нанотехнологий

– возможностям применения композиционных материалов для антенных конструкций на основе нанокompозитов (углекompозитов). Нанокompозиты — это современный многофункциональный материал, содержащий нано-

размерные частицы и обладающий уникальными свойствами, которые до конца еще пока не изучены. Но интерес к ним проявляется очень большой.

Таким образом, можно сделать одно важное заключение, что в указанных функциональных системах имеется возможность найти революционное применение нанотехнологий для создания не только РЛС, но и радиотехнических систем нового поколения различного назначения. Появляется возможность путем использования метаматериалов в антенных системах в зависимости от их размеров и расположения облучателей обеспечивать более улучшенную направленность как антенны, так и разрешающих возможностей РЛС обнаружения и наведения.

Литература

1. Быстров Р.П., Гвоздев А.Е., Немцов А.В., Никитов С.А., Шерemet И.Б. Микро- и нанoeлектроника в системах радиолокации. Монография. Под ред. Р.П. Быстрова // — М.: Типография 3 ЦНИИ МО РФ. 2012. 234 с.

2. Новости МЭМС и нанотехники. www.smalltimes.com.

3. Пчелин В.А. Создание мощных СВЧ-усилителей на полевых транзисторах на основе разработанных экспериментально-расчетных методик // Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Фрязино, 2007. http://www.istok-mw.ru/science/dis_sov/dis_sov.htm

4. 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. 312 с.