

Проблемы разработки и применения нано- и микросистемной техники в перспективных изделиях РКТ

А.А. Жуков, В.Б. Стешенко, А.В. Капустян

ОАО «Российские космические системы», kap_av@mail.ru

Аннотация — Рассмотрены вопросы разработки и применения нано- и микросистемной техники в перспективных изделиях ракетно-космической техники. Приведены некоторые примеры использования микро- и наносистемной техники для изделий ракетно-космической техники: телекоммуникационной аппаратуры, систем терморегуляции, робототехнических систем, приемопередающих антенн и частотно-избирательных поверхностей на основе метаматериалов, оптических систем и систем дистанционного зондирования Земли. Показаны особенности применения микро- и наносистемной техники в условиях космического пространства и определены основные проблемы и пути их решения по применению микро- и наносистемной техники в перспективных изделиях ракетно-космической техники.

Ключевые слова — микро- и наносистемная техника, ракетно-космическая техника, метаматериалы, наноспутник.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие аппаратуры космического назначения за последние 50 лет осуществлялось согласно двум основным тенденциям: уменьшение габаритно-массовых характеристик и расширение функциональных возможностей. Сегодня аппаратура космического назначения представляет собой сложнейшие функциональные блоки, разработанные с применением высоконадежной электронной компонентной базы. Решить задачу снижения габаритно-массовых характеристик функциональной аппаратуры возможно за счет нано- и микросистемной техники (НСТ и МСТ), применение которых позволяет получать микромеханические и электронные узлы значительно меньших размеров, чем это возможно по традиционным технологиям (рис. 1). Выполнение МСТ по интегральной технологии позволяет добиться высоких рабочих характеристик, поскольку схемы обработки сигнала и МСТ интегрированы в единой подложке, повысить их надежность по сравнению с системами на дискретных компонентах, а также существенно понизить их стоимость.

Наиболее востребованными функциональными блоками в настоящее время являются блоки на основе МСТ для СВЧ-применений (радиочастотные микропереключатели, устройства на ПАВ, малогабаритные микрополосковые антенны и антенны,

выполненные с применением метаматериалов), навигации (микрогироскопы, датчики скоростей и ускорений), исследовательской аппаратуры (микродатчики физических величин, системы тепловода и термостабилизации) и оптических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (микрзеркала, микроболометры, модуляторы оптического и ИК-излучения).



Рис. 1. Применение МСТ и НСТ в аппаратуре РКТ

Целью работы является обзор основных проблем разработки и применения нано- и микросистемной техники в перспективных изделиях ракетно-космической техники (РКТ).

II. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТРОЙСТВ МСТ И НСТ ДЛЯ КОСМОСА

Среди множества зарубежных публикаций о возможности создания перспективной аппаратуры космического применения с использованием устройств МСТ можно выделить несколько областей, в которых сосредоточено наибольшее число поисковых и прикладных работ. Рассмотрим основные из них.

A. Телекоммуникационная аппаратура

Механические управляемые устройства широко используются в высокочастотной технике, на больших уровнях мощности они превосходят по основным характеристикам устройства на полупроводниковых приборах. Технология МСТ позволяет совершенствовать технические характеристики радиосистем, расширять функциональные

возможности средств мобильной связи, узлов космической аппаратуры. Уникальные свойства устройств МСТ позволяют реализовывать перестраиваемые широкополосные системы связи и радиолокации сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн [1]. Современные коммуникационные системы беспроводной связи, такие как система сотовой телефонной связи GSM, WCDMA и другие, предъявляют высокие требования к добротности, динамическому диапазону и уровню фазового шума радиочастотных многоканальных фильтров и управляемых напряжением генераторов, уровню рабочих напряжений и мощностей, требуют внедрения новых функциональных возможностей, включающих в себя микроминиатюрные запоминающие устройства и микрофоны, что влечет за собой поиск возможности реализации всего устройства на одном кристалле [2]. В связи с этим в последние годы широкое развитие получила принципиально новая технология реализации микроэлектромеханических резонансных устройств, катушек индуктивности, управляемых напряжением конденсаторов, коммутаторов с низким уровнем вносимых потерь и других устройств на одном кристалле, которая к тому же совместима со стандартной технологией изготовления интегральных микросхем – технология МСТ [2]. Таким образом, фильтры, генераторы и устройства связи, выполняемые сейчас на дискретных пассивных элементах и резонаторах, потенциально могут быть реализованы в микроразмере на одном кристалле с помощью технологии МСТ. Кроме того, одновременно с миниатюризацией применение технологии МСТ открывает новые возможности в разработке аппаратуры связи, коренным образом изменяя ее архитектуру наряду с улучшением основных характеристик, таких как добротность, потребляемая мощность, уровень шумов, ширина полосы пропускания канала фильтрации [2]. На сегодняшний день для применения в телекоммуникационной аппаратуре с помощью МСТ-технологии разработаны [3]-[6]:

- управляемые высокочастотные микроконденсаторы;
- радиочастотные микропереключатели, работающие на частоте до 9 ГГц (рис 2);
- объемные катушки индуктивности с высокой добротностью на частоте до нескольких гигагерц;
- электромеханические резонаторы, работающие в диапазоне частот (8...1800) МГц и имеющие добротность 20000...3000, соответственно;
- фильтры, потери которых не превышают 0,2 дБ; смесители-фильтры (конструктивно объединенные) с суммарным уровнем шума не хуже 3,7 дБ;
- коммутаторы постоянного и переменного тока с частотой коммутации несколько мегагерц, с коммутируемой мощностью до (0,5...2) Вт и вносимыми потерями - 0,1 дБ;

- антенны и антенные матрицы;
- микрополосковые и коаксиальные линии с распределенными параметрами.

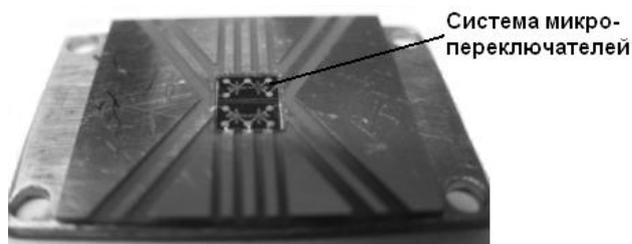


Рис. 2. Система микропереключателей на кристалле [7]

В. Системы терморегуляции

Одним из главных «уязвимых» мест в конструкциях космических аппаратов (КА) являются его теплозащита и тепловые режимы в процессе эксплуатации в космическом пространстве, от которых существенно зависят надежные и стоимостные характеристики. Теплообмен в составных частях КА в космическом пространстве может осуществляться в основном за счет излучения в окружающее пространство. Причем, для крупногабаритных КА известно достаточно большое количество технических решений, обеспечивающих тепло- и/или теплоперенос от более к менее нагретым составным частям с последующим излучением от последних. Для малых КА (микроплатформы, нано- и пикоспутники) с массой менее 20 кг вопросы терморегуляции становятся еще более актуальными, поскольку соотношение массогабаритных характеристик систем теплообмена, выполненных по традиционным технологиям, к массогабаритным характеристикам самого КА становится явно не в пользу последних. Так как с уменьшением размера КА необходимо уменьшать и размеры теплоотводящих систем, то это приводит к техническому противоречию – размер КА уменьшится, а холодильника – нет.

В этой связи становится привлекательным использование новых технологий и, прежде всего, технологий МСТ [8]-[10]. В США с 2006 года в лабораториях NASA проводятся работы по созданию электрорегулируемых покрытий с изменяемой отражающей способностью (Variable Emissance Coating) на основе технологий МСТ, обеспечивающих существенное снижение массогабаритных характеристик теплоотводящих систем. Реализация подобных систем возможна на основе эффекта памяти формы, а также с помощью электроуправления (Sensortex Inc., США).

Впервые в РФ, созданы технологии и опытные образцы систем терморегуляции на основе термомеханических актюаторов (рис. 3), действие которых основано на биморфном эффекте пары материалов с различным КТР (кремний и термостойкий полимер), и функционирующих в диапазоне температур от минус 190 до +300 °С [11].

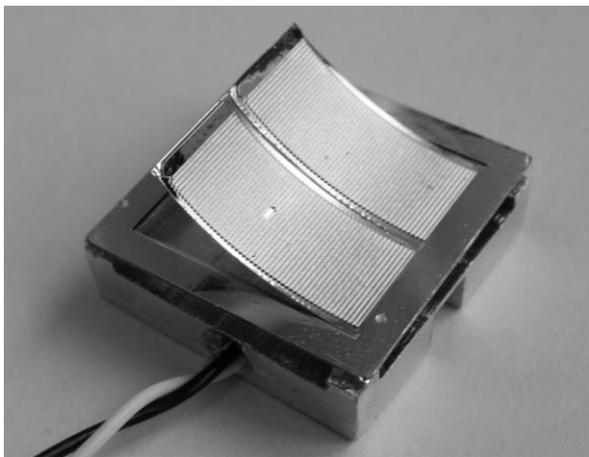


Рис. 3. Элемент системы терморегуляции [11]

Тепловые микросистемные актюаторы могут быть классифицированы как автономные саморегулирующиеся пассивные средства изменения площади излучающей поверхности радиационных теплообменников КА и их составных частей.

Применение совместно с актюаторами полимерных пленок с прогнозируемым испарением под влиянием факторов космического пространства, например, пленок из полиимида различной толщины, позволит без дополнительных затрат энергии, массы и ресурса бортового вычислительного комплекса программируемо увеличивать площадь радиационной поверхности теплообменника-излучателя КА. Площадь теплообменника излучателя выбирается с учетом деградации термооптического покрытия на конец срока активного существования КА и на начало его эксплуатации является избыточной, что приводит к повышенному расходу энергии и выработке ресурса системы электропитания в начальный период эксплуатации КА. Применение актюаторов совместно с испаряемыми пленками-экранами позволит снизить электропотребление систем терморегуляции и сберечь ресурсы системы электропитания [11].

Особенно привлекательными свойствами тепловых микросистемных актюаторов являются:

- отсутствие необходимости подачи на актюаторы электропитания и создания обратной связи средствами датчиковой аппаратуры КА;
- отсутствие необходимости в аппаратуре управления и контроля, в том числе за счет ресурсов бортового вычислительного комплекса;
- малая масса устройств (от 20 до 120г/м²).

C. Робототехнические системы

Основными элементами робототехнических систем являются микроприводы. Микроприводы имеют размеры от нескольких квадратных микрометров до нескольких квадратных сантиметров и обеспечивают перемещение от долей микрон до нескольких миллиметров. Они занимают одну из главенствующих

позиций среди всех микроэлектромеханических устройств ввиду широкого разнообразия выполняемых ими функций и возможности их использования во многих областях современной науки и техники [12]-[16].

На основе микроприводов возможно реализовать микроконвейеры [17], обеспечивать измерение и контроль потоков веществ, а также использовать в антенных системах, где с их помощью можно менять диаграмму направленности антенны без изменения её формы и положения в пространстве [18]. Существует множество разновидностей микроприводов, работающих на разных физических принципах, однако термомеханические микроприводы обладают самыми большими усилиями подъёма на хвостовике подвижного элемента (порядка 0,001 Н) и перемещением (10...150) мкм [18].

D. Приемопередающие антенны и частотно-избирательные поверхности (ЧИП) на основе метаматериалов, МСТ и НСТ

ЧИП широко применяются для фильтрации характеристик в микроволновой, миллиметровой и инфракрасной областях длин волн для создания частотно и невзаимных пространственно селективных поверхностей корпусов самолетов-невидимок, наземной части плавучих средств и радиопрозрачных укрытий, или так называемой умной кожи (smart skin). ЧИП нашли применение в разнородных рефлекторных антеннах, защитных кожухах антенн [19] и в приложениях, имеющих отношение к связи или выполняющих защитную функцию. ЧИП предназначены для фиксированного частотного отклика.

Для некоторых приложений желательно наличие возможности изменения частотного поведения во времени. Увеличение развязки между элементами радиоэлектронной аппаратуры, в том числе излучателей, установленных в составе фазированных антенных решеток, резко повышает тактико-технические характеристики аппаратуры радиолокации и связи, устанавливаемой на борту малых летательных аппаратов военного и гражданского назначения.

Особенностями ЧИП являются низкие вносимые потери передачи сигнала и отражения, широкая полоса частот, высокий уровень кросс-поляризационной селекции (выделения поперечной поляризации) [20]. В большинстве случаев структуры ЧИП состоят из массива элементов, размещенных на одном или вставленных между несколькими диэлектрическими слоями, которые не только обеспечивают механическую поддержку, но также влияют на частотную зависимость пропускания структуры.

Структуры ЧИП называют активными в случае, когда такие характеристики, как частота и коэффициент передачи могут меняться в зависимости от приложенного воздействия. Например, в определенный момент времени ЧИП может быть

переключен из отражающего состояния в состояние полной прозрачности, кроме того, уровень передачи или отражения сигнала может быть изменен во времени [21]. Использование активных компонентов в массиве ЧИП позволяет изменять поверхностное сопротивление, прозрачность, отражательную способность или поглощение в зависимости от требований потребителя.

Важной составляющей навигационной аппаратуры являются приемопередающие антенны. Малые размеры микро- и наноспутников не позволяют разместить на борту антенны, выполненные по традиционным технологиям. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование малогабаритных антенн на основе метаматериалов, которые представляют собой облучатели в виде полосковой антенны и пластинки метаматериала, расположенного над облучателем. Метаматериал представляет собой объемную решетку плоских металлических спиралей, расположенных внутри диэлектрической пластины. Электромагнитная волна, излучаемая облучателем, дифрагируя через пластину, приобретает более узкую диаграмму направленности.

Применение метаматериалов в антеннах, встраиваемых в приемопередающую аппаратуру малых космических аппаратов, скафандров космонавтов, позволяет добиться уменьшения их габаритов в 2...5 раз и массы более чем в 1,5...2 раза.

Используя подобные антенны возможно получить более высокий коэффициент усиления при неизменных размерах апертуры антенны (и, как следствие, повышение помехоустойчивости и дальности связи).

Использование метаматериальных структур в поглощающих экранах позволяет ослабить вредное влияние СВЧ-излучения на пользователей мобильной связи, понизить уровень боковых и задних лепестков диаграммы направленности антенны более чем в 30 раз и тем самым обеспечить создание миниатюрных прецизионных устройств позиционирования и спутниковой навигации [22].

По оценкам специалистов, выход на коммерческий уровень разработки возможен через 2 года в части дешевых малогабаритных функциональных элементов радиоэлектронной аппаратуры на основе метаматериалов с полимерным корпусом и встроенными микроэлектронными элементами.

Е. Оптические системы и системы ДЗЗ

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обладают значительными массогабаритными характеристиками и высоким энергопотреблением. Наиболее важной частью системы ДЗЗ являются сканирующие элементы оптических систем и система их позиционирования. Одним из вариантов улучшения массогабаритных характеристик системы ДЗЗ является замена единичного макроскопического отражающего элемента массивом микрозеркал с электростатическим

принципом поворота, это позволит отказаться от массивной системы позиционирования сканирующего элемента и значительно уменьшить размеры всей системы.

Поворотное микрозеркало (единичный конструктив сканирующего элемента) представляет собой сложное многоуровневое устройство микросистемной техники, изготовленное по технологии поверхностной микрообработки. Малые габариты микрозеркала позволяют разместить на площади одного квадратного сантиметра до миллиона единиц таких зеркал, а малая масса такой конструкции (порядка 0,5 микрограмм) обеспечит повышенное быстродействие всего сканирующего элемента за счет малой инерционности. Поворот микрозеркала осуществляется за счет электростатической силы, возникающей при подаче напряжения на управляющие электроды (не более 30 В). По оценке это позволит использовать системы ДЗЗ нового поколения в малых КА массой до 20 кг.

В настоящее время высокоэффективные оперативные наблюдения в тепловой области спектра возможны только с применением многоэлементных ИК фотоприёмников. Основными факторами, влияющими на обнаружительную способность подобных систем, являются низкочастотные тепловые шумы фотоприёмников.

Единственным эффективным способом борьбы с ними является применение высокочастотных ИК модуляторов, работающих в спектральном диапазоне 3,5...12,0 мкм. Это позволяет значительно снизить уровень шумов в видеосигнале и в несколько раз повысить тепловое разрешение, а, соответственно, и обнаружительную способность аппаратуры за счет реализации предварительной калибровки с применением быстродействующего ИК модулятора. Уровень сигнала от объекта меняется постоянно, и отделить полезный сигнал от низкочастотной шумовой составляющей обычным способом невозможно. С применением быстродействующих ИК модуляторов вместо потока от объекта на фото-приемное устройство подается опорный калиброванный поток излучения, позволяющий скорректировать низкочастотную шумовую составляющую сигнала (лучше 0,1 К).

Для уменьшения вредного воздействия неинформационной составляющей светового потока в оптическом тракте применяется ряд средств: диафрагмирование, просветление поверхностей оптических деталей и пр. Существенным средством его минимизации является обработка и окраска («чернение») внутренних поверхностей конструктивных деталей объектива, создающее наилучшее светопоглощение во всем регистрируемом спектральном диапазоне излучения, а также применение бленды, внутренняя поверхность которой также покрыта черным светопоглощающим материалом. Проблема может быть решена путем создания светопоглощающих покрытий оптических

трактов на основе наноструктур, работающих на принципе поглощения излучения [23].

Определяющей характеристикой таких покрытий является интегральный коэффициент поглощения A_s в ИК диапазоне длин волн. В настоящее время существует множество типов промышленно выпускаемых покрытий с коэффициентом $A_s \approx 96...97\%$. Однако для сверхчувствительных оптических систем (в основном для астрономических наблюдений) в условиях космического пространства требуется применение покрытий с коэффициентом $A_s = 99,8...99,9$.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностями аппаратуры, применяемой в космической технике, являются требования повышенной надежности, повышенной стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства и увеличенный срок активного существования. Для активного внедрения устройств МСТ в космическую технику необходимо решить ряд проблем фундаментального, технологического и организационно-технического характера.

К проблемам фундаментального характера следует отнести:

- создание достоверных поведенческих моделей устройств МСТ в условиях космического пространства, в том числе моделей конструкционных материалов, из которых выполнены устройства;

- исследование новых эффектов и принципов работы устройств МСТ и НСТ для перспективной аппаратуры РКТ;

- создание методик оценки надежностных характеристик и ускоренного старения элементов конструкции устройств МСТ.

Для решения проблем технологического характера необходимо:

- создание технологий поверхностной и объемной микрообработки, интегрированных в технологию полупроводниковых и/или гибридных интегральных схем;

- создание технологий сборки и специализированных испытаний (необходимо аттестовать технологию изготовления и методики испытаний устройств МСТ, т.е. по сути создавать систему государственной стандартизации продукции данного типа).

Для решения проблем организационно-технического характера необходимо решить две основных задачи:

- обеспечение разработчиков МСТ высокопроизводительными САПР. Современный процесс создания технических изделий включает в себя построение 3D-моделей объектов разработки и большой объем компьютерного моделирования, и

устройства МСТ в этом плане не исключение. Более того, в существующие САПРы (такие как AnSYS, SolidWork, MEMSLab и др.) необходимо добавлять соответствующие библиотеки материалов, технологических процессов и условий работы, уникальных для каждого изделия;

- оснащение существующих микроэлектронных производств современным высокотехнологичным оборудованием, преимущественно импортного производства;

- обеспечение высокочистыми воспроизводимыми (от партии к партии) материалами;

- обеспечение кадрами, прошедшими подготовку в ведущих отечественных и зарубежных научных школах.

Особое внимание необходимо уделить проблемам натуральных испытаний. Анализ отечественной и зарубежной литературы [1]-[25] показывает, что электронная компонентная база космического применения, разработанная с использованием устройств МСТ с 2002...2004 гг. начала активно испытываться (в основном США и Японией) в реальных условиях космического пространства. Для подобных задач проводятся космические эксперименты, где в качестве испытательных платформ используются МКС, крупногабаритные спутники исследовательского назначения и малогабаритные космические аппараты. Малогабаритные пико- и наноспутники наиболее перспективны (с точки зрения гибкости условий) для проведения космических экспериментов [24], [25]. Одной ракетой-носителем легкого класса можно вывести до десяти микроспутников (при массе одного спутника не более 10 кг) на различные траектории с различным временем полета. Испытания в космическом пространстве (в условиях совместного воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства) позволяют освоить новые принципы построения функциональных узлов и блоков аппаратуры для малогабаритных спутников.

Таким образом, решение указанных проблем позволит обеспечить качественный скачок в развитии как информационно-телекоммуникационных систем, построенных на базе малых КА, так и пилотируемых и автоматических КА ближнего и дальнего космоса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проектов Министерства образования и науки Российской Федерации (Госконтракт №16.740.11.0080 от 11.09.2010 г. и Госконтракт 16.426.11.0038 от 31.05.2011 г.)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ефимов А.Г. Методы создания СВЧ-модулей систем космической связи. Диссертация на соискание ученой степени. М., 2009. 213 с.
- [2] Колпаков Ф.Ф., Борзяк Н.Г., Кортунов В.И. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике

- и системах телекоммуникаций. Учеб. пособие. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. 82 с.
- [3] Королева В.А., Капустян А.В., Жуков А.А., Гоголинский К.В., Усеинов А.С. Оценка изгибной жесткости и деформации микроразмерных исполнительных элементов устройств микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 39-42.
- [4] Yang Z., Lichtenwalner D., Morris A., Menze S., Nauenheim C., Gruverman A. A new test facility for efficient evaluation of MEMS contact materials // *J. Micromech. Microeng.* 2007. № 17. P. 1788-1795.
- [5] Соловьев Ю.В., Волков В.В., Александров С.Е., Спешиллов А.Б. МЭМС-переключатель резистивно-емкостного типа // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 65-68.
- [6] Repchankova A. Anti-stiction and self-recovery active mechanisms for high reliability rf-mems switches // *PhD Dissertation*. 2010.
- [7] Королева В.А., Болтунов Д.В., Гребенюк Л.В., Жуков А.А. Исследование морфологии пленок гальванического никеля для устройств микросистемной техники. Микротехнологии в космосе // Труды VIII научно-технической конференции «Микротехнологии в космосе». 6-7 октября 2010 г. / Под ред. Ю.М. Урличича и А.А. Ромнова. М.: Радиотехника, 2011. 208. С. 93-97.
- [8] Корпухин А.С., Бабаевский П.Г., Жуков А.А., Козлов Д.В., Смирнов И.П. Влияние условий формирования и толщины несущего полиимидного и функциональных металлических слоев на термодформационные характеристики полиимид-кремниевых упруго-шарнирных слоистых консольных балок тепловых актюаторов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 2.
- [9] Козлов Д.В., Смирнов И.П., Жуков А.А., Шахнов В.А. Экспериментальное исследование силовых характеристик рабочего элемента тепловых микроактюаторов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2011. № 2.
- [10] Ануров А.Е. Микросистема терморегуляции малых космических аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. № 45.
- [11] Селиванов А.С., Жуков А.А., Дмитриев А.С., Урличич Ю.М., Корпухин А.С. Микроструктурная система терморегулирования космического аппарата. Заявка на изобретение №2010131967/11. 29.07.2010. Решение о выдаче патента от 23.04.2012.
- [12] Корпухин А.С., Жуков А.А., Козлов Д.В., Смирнов И.П., Сухоруков А.Г., Бабаевский П.Г. Оценка влияния многоциклового изгиба на термодформационные характеристики упруго-шарнирных балок тепловых микроактюаторов // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 12. С. 22-25.
- [13] Жуков А.А. [и др.] Физико-механические характеристики композиционных слоистых материалов на основе полипиромеллитимида для термомеханических актюаторов // Перспективные материалы. Специальный выпуск (6). 2008. Ч. 2. № 12. С. 239-241.
- [14] Козлов Д.В. [и др.] Влияние армирования полиимидного слоя одностенными углеродными нанотрубками на термодформационные характеристики полиимид-кремниевых балок тепловых микроактюаторов // Материаловедение. 2011. № 9. С. 43-46.
- [15] Trinh Chu Duc, Gih-Keong Lau, Polymeric Thermal microactuator with embedded silicon skeleton: part II— fabrication, characterization, and application for 2-DOF microgripper // *Microelectromechanical systems*. Aug. 2008. Vol. 17. Issue 4. С. 823-831.
- [16] Жуков А.А., Корпухин А.С., Смирнов И.П., Козлов Д.В., Бабаевский П.Г. Тепловой микромеханический актюатор и способ его изготовления. Заявка на изобретение 2010111378 от 25.03.2010. Решение о выдаче патента от 28.11.2011. Патент РФ № 2448896.
- [17] Thorbjörn Ebeffors, Polyimide V-groove joints for three – dimensional silicon transducers // Thesis for the degree of Doctor of Philosophy at the Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000.
- [18] Жуков А.А., Корпухин А.С., Смирнов И.П., Козлов Д.В. Микросистемное устройство управления поверхностью для крепления плоской антенны. Заявка на изобретение 2011109331/07(013535) от 11.03.2011. Решение о выдаче патента 07.02.2012.
- [19] Chang T.K., Langley R.J., Parker E.A. Active frequency-selective surfaces // In Proc. IEEE Microwaves, Antennas Propag. 1996. V. 143. P. 62–66.
- [20] Su Hansheng, Liu Xiaoming, Li Daohui, Chen Xiaodong, Parini C.G., Kreouzis T. Design and analysis of AFSS // 21ST International Symposium on Space Terahertz Technology. 2010. P. 360 - 363.
- [21] Parker E.A. Application of FSS Structures to Selectively Control the Propagation of signals into and out of buildings Annex 5: Survey of Active FSS // ERA Technology Ltd. 2004. 28 p.
- [22] Sievenpiper D., Zhang L., Broas R. F. J., Alexopolous N. G., Yablonovitch E. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* Nov. 1999. Vol. 47. pp. 2059–2074.
- [23] Springer Handbook of Nanotechnology. 2nd Edition. Bharat Bhushan (Ed). Springer. 2007. 1916 p.
- [24] Биндель Д., Овчинников М.Ю., Селиванов А.С., Тайль Ш., Хромов О.Е. Наноспутник GRESAT. Общее описание. ИПИМ им. М.В. Келдыша РАН, 2009.
- [25] Carlisle C., Webb E. et al. ST5 Project Technology Validation Report, New Millennium Program document ST5. P. 495–586.