

УДК 629.786, 539.21

Ю. А. Клименко, О. К. Черемных,
В. А. Яценко, Н. В. Маслова

Інститут космічних досліджень НАНУ та НКАУ, Київ

Состояние и перспективы создания микроспутников новых поколений: новые материалы, нанотехнология и архитектура

Надійшла до редакції 04.05.00

Обговорюються можливості використання мікросистемних технологій в космічній галузі. Розглянуті окремі питання концепції побудови мікросупутників, використання нових матеріалів для них (провідні полімери, фулерени, нанотрубки, молекулярні шари та ін.), інформаційного забезпечення і можливих перспектив впровадження нанотехнологій в космічне приладобудування.

1. ВВЕДЕНИЕ

С момента зарождения космонавтики высокая стоимость космических полетов и длительное время подготовки к ним остаются основными препятствиями для эффективного освоения космического пространства. Так, средняя стоимость одной космической миссии в начале 1990-х гг. составляла 553 млн долларов и равняется 165 млн долларов сейчас. По прогнозам на 2004 г. она составит 50 млн долларов, и хотя имеет тенденцию к понижению, все же остается довольно высокой. Время на подготовку к космическому полету занимало 8.1 г. в 1990—1994 гг. и приблизительно равняется 4 г. сейчас. Это ограничивает число ежегодных космических миссий. Например, в 1994 г. NASA осуществило 11 запусков, а в 1999 — 28 [25].

По признанию NASA такие темпы завоевания космоса являются недостаточными и не соответствуют реальному уровню научно-технического развития общества. В подтверждение этих слов приведем высказывания руководителя NASA Д. Голдина: «Нам нужно уже сейчас научиться делать космические корабли таким же способом, каким мы сейчас делаем компьютеры» и аналитика по космическим стратегиям при конгрессе США М. Смита: «Нам нельзя терять специалистов, которые не хотят ждать 10 лет, пока корабль будет задуман и пост-

роен, а затем еще 6 лет, пока космическая миссия будет завершена» [25].

Один из путей уменьшения стоимости космической миссии связан с использованием дешевых систем многократного использования пусковой установки, разработкой которых занимается ряд фирм. Данный подход, хотя активно и пропагандируется сейчас, не решает проблемы в целом, поскольку вывод массивных космических аппаратов за пределы земной атмосферы требует огромных энергетических затрат.

Иной путь удешевления миссии состоит в радикальном уменьшении массы беспилотных космических кораблей — вплоть до нескольких килограммов и даже сотен граммов (для сравнения, вес космических кораблей в начале 1990-х гг. составлял несколько тонн и в настоящее время уменьшен до сотен килограммов). Это предполагает активное использование современных технологических достижений и в перспективе позволит объединить микромеханизмы, микросенсоры, микроприводы и встроенную электронику космических аппаратов в единую систему сверхмалых размеров и массы. Именно этот подход считается в данный момент наиболее многообещающим и перспективным, хотя он и не сулит решение проблемы уже сегодня.

В новом стратегическом плане NASA «Быстрее, лучше, дешевле» утвержденном в декабре 1997 г.,

предполагается осуществить плавный, но глобальный переход от классической эры больших космических кораблей, непосредственно построенных человеком, к новой эре самособирающихся космических аппаратов. Этот план не имеет четко ограниченных временных рамок и направлен на активное внедрение современных достижений нанотехнологии, микромехатроники и молекулярной электроники в создание миниатюрных, сверхлегких и дешевых узлов космической техники как для больших космических кораблей (масса 500—10000 кг), миниспутников (100—500 кг), микроспутников (10—100 кг) и наноспутников (1—10 кг), так и для сверхмалых космических аппаратов новых поколений — пикоспутников (0.1—1 кг) и фемтоспутников (менее 0.1 кг). На базовые исследования в этом стратегическом направлении уже выделяются 160 млн долларов в год, и с каждым годом объем финансирования будет увеличиваться [25]. Примечательно, что из 2000 грантов, ежегодно финансируемых NASA в рамках программы «Меньше, быстрее, лучше, дешевле», 1500 грантов не являются проектами ученых из подразделений NASA, что свидетельствует о высокой интегрирующей роли данного плана для развития передовых технологий мировой науки в целом.

К настоящему времени идея внедрения достижений нанотехнологии в космическую отрасль уже не является просто фантастикой. Об этом свидетельствует ряд последних симпозиумов и конференций, проводимых под руководством NASA и европейских космических агентств. В первую очередь отметим симпозиумы и конференции, полностью посвященные данному вопросу: «From Microsystems to Nanotechnology for Space Systems» (март 1998, Великобритания) и ежегодные «The International Conference on Integrated Nano/Microtechnology for Space Applications» (ноябрь 1998 и январь 2000, США). Тематика докладов данных конференций, а также многочисленные материалы из научных журналов и сети Интернет позволяют непосредственно судить об уровне развития передовых научных технологий, об этапах и перспективах их внедрения в космическое материаловедение и приборостроение. К этому вполне уместно добавить слова Бредли Файлса, руководителя проекта по углеродным нанотрубкам Джонсоновского космического центра (Хьюстон, США): «Если мы хотим полететь на Марс через 10 или 15 лет, то нам уже сейчас необходимо сфокусироваться на новых научных направлениях, охватывающих сверхлегкие и сверхпрочные композиты, химические сенсоры, проводящие полимеры, наноэлектронные приборы, накопители водорода, и на других потенциальных

приложениях с использованием углеродных нанотрубок» [17].

2. СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ РАЗВИТИЯ МИКРОСПУТНИКОВ

Как отмечалось выше, разработка микроспутников осуществляется в целях создания космических средств, позволяющих существенно снизить время и затраты на создание космического аппарата, а также для активизации деятельности научно-исследовательских организаций в области космических исследований и для развития международного сотрудничества.

Микроспутники необходимы для решения многих хозяйственных задач. Их используют для дистанционного зондирования Земли (в интересах природопользования, сельского хозяйства, экологии, навигации, метеорологии и картографии), для поиска и идентификации очагов возгорания на Земле, для наблюдения за миграцией косяков рыб, за движением океанских льдин и нефтяных пятен, в качестве спутников погоды и связи, военных спутников и пр. Микроспутники необходимы для проведения различных физических и технических экспериментов по отработке перспективного бортового оборудования КА и для специальных научных исследований. Область применения микроспутников не исчерпывается перечисленными задачами, их принципы унификации и техническая реализация должны обеспечивать возможности выполнения и других, более специфических, задач.

С момента зарождения космонавтики в конце 1950-х гг. спутники претерпели ряд изменений, связанных с различными техническими, политическими и экономическими факторами. Вплоть до начала 1990-х гг. политическое противостояние СССР и США давало жизнь многим амбициозным проектам, требующим вывода массивных и крупногабаритных приборов (интерферометров, космических телескопов и пр.) на околоземную орбиту. Это повлекло за собой увеличение массы и размеров спутников и потребовало использования более мощных и дорогих средств выведения космических аппаратов на орбиту. Все это не могло не сказаться на стремительном росте стоимости космической миссии (вплоть до нескольких десятков миллиардов долларов), однако на тот момент данный фактор не имел решающего значения в силу единичных космических запусков и политического противостояния.

Статистика некоммерческих запусков NASA за период 1955—2000 гг. отражает четкую тенденцию

увеличения массы спутника (вплоть до 1992 гг.) и последующее ее резкое снижение. Помимо очевидных политических причин, такое падение объясняется следующим. При ограниченном государственном финансировании космических агентств рост стоимости космических миссий неизбежно уменьшил бы количество ежегодных запусков. В этом случае неудача какой-либо миссии (поломка дорогостоящих приборов либо потеря контроля над космическим аппаратом) приводила бы к большим финансовым потерям, к невозможности повторного запуска и удару по престижу агентства. Единственная возможность уменьшить степень такого риска — сокращение стоимости космических миссий, что и влечет за собой уменьшение взлетной массы.

В настоящий момент времени одновременно существуют три различных стратегии проектирования космических аппаратов.

Первая стратегия (Conventional Subsystem by Subsystem Design) — это традиционный и хорошо зарекомендовавший себя ранее метод, предполагающий изготовление спутника под конкретное техническое задание. Здесь каждый структурный компонент спутника изготавливается отдельно и проектируется таким образом, чтобы в максимальной степени обеспечить выполнение данной космической миссии. Преимуществом такого подхода является оптимальная способность спутника к выполнению данной миссии, а его недостатки следуют из его уникальности — это высокая стоимость космического аппарата и невозможность использования спутниковых разработок для иных космических миссий без существенной переделки.

Поскольку в настоящее время осознана невозможность выполнения некоммерческих космических миссий стоимостью в миллиарды долларов, в рамках данного подхода удалось существенно снизить массу космических кораблей от нескольких тонн до сотен килограммов, и как следствие, уменьшить стоимость КА до уровня в несколько десятков миллионов долларов.

Однако в сфере коммерческих космических запусков ситуация несколько иная. Многие коммерческие компании США («Hughes», «Aerospatiale», «Lockheed Martin» и др.) и поныне осуществляют запуск космических аппаратов, которые именно за счет увеличения размеров КА и роста энергопотребления способны обеспечивать все более высокий уровень качества связи. В первую очередь это относится к спутникам на высокой геостационарной орбите, поскольку сильное поглощение сигнала по пути его следования на спутник и обратно требует большой мощности передающего сигнала и увеличения диаметра спутниковой антенны.

Вторая стратегия является модульной (Modular Design). В рамках этой стратегии все спутниковые компоненты изготавливаются традиционным способом, однако они проектируются не только под конкретную космическую миссию, но и для серии ее подобных. В результате стоимость космического аппарата существенно снижается, однако снижается и степень готовности спутника к выполнению данной космической миссии. Модульная стратегия изначально ориентируется на задачи, допускающие использование серии идентичных спутников (военные и погодные спутники, спутники радиационного и электромагнитного наблюдения Земли и пр.). Американские спутники серии «SMEX» (Small Explorer) и «MightySat» являются примерами такого модульного подхода. Используемая в них платформа, включающая подсистемы энергетики, обработки данных, ориентации и управления, является стандартной в пределах серии.

Третья стратегия ориентирована на изготовление унифицированных космических аппаратов с предельно низкой стоимостью, влекущей за собой высокую степень их незащищенности (Low Cost/High Risk Design). Предложенная в середине 1980-х гг., стратегия была основана на осознании того факта, что для успешного выполнения миссии более предпочтительным является запуск не одного большого и дорогого КА, а серии малых и дешевых космических сателлитов (распределенных спутниковых систем), пусть даже и с высокой вероятностью фатальной поломки каждого. В самом деле, если r — надежность индивидуального КА, то надежность R серии из n спутников определяется формулой $R = 1 - (1 - r)^n$. Принимая для примера $r = 0.1$ и $n = 32$, получим $R = 0.97$, т. е. достаточно высокую степень успешного завершения миссии, с трудом доступную традиционным космическим кораблям. Итак, появление к жизни микроспутников является следствием решения дилеммы: «высокая стоимость и высокая надежность» либо «низкая стоимость и низкая надежность» в пользу второго пути.

Преимуществом третьей, революционной, стратегии является тот факт, что унифицированные микроспутники гораздо дешевле традиционных сателлитов и возможен их серийный запуск. Ее основные недостатки на сегодняшний день — это недостаточная надежность КА, сравнительно малое время жизни на орбите и невозможность оснащения спутников крупногабаритными приборами.

Распределенные системы из унифицированных спутников могут быть использованы в задачах глобальной навигации и космической связи, глобального зондирования Земли и непосредственно для

нужд космической науки. За счет использования коммерческих и дешевых технологий производства портативных и карманных компьютеров здесь становится возможным бортовое хранение и обработка данных. Однако из-за ограниченных энергетических ресурсов микроспутников такая обработка информации может производиться с очень низкой скоростью.

В течение 1990—1998 гг. космическими агентствами многих стран были осуществлены запускиnano- и пикоспутников, которые по тем или иным причинам уже прекратили свое существование. Это шары-зонды QQW-1 и QQW-2 (1990 г., масса по 4 кг), сантиметровые сферы для калибровки радиолокаторов ODERACS A-F, ODERACS 2A-2F (1994 г., масса 1.5—5 кг, запускались из «Шаттла»), радиопередатчик «Спутник-40» (1997 г., масса 3 кг), радиомаяк «Спутник-41» (1998 г., масса 4 кг), радиопередатчик «Спутник-Юниор-3» (1999 г., масса 3 кг); последние три спутника запускались с орбитальной станции «Мир» и др.

За 1998—1999 гг. были выведены на орбиту и ныне функционируют многие nano- и пикоспутники. Спутники TUBSAT-N и TUBSAT-N1 (Германия, предназначены для наблюдения за средними и крупными млекопитающими в Северном Ледовитом океане, поиска украденных автомобилей, сбора данных с автономных станций контроля окружающей среды (масса 8 кг и 3 кг, были одновременно запущены 1998 г. из находящейся в Баренцевом море российской подводной лодки), ASUSAT-1 (США, радиоретранслятор, масса 5 кг), BITSY (США, спутник связи, масса 1 кг), Munin (Швеция, электронные и ионные измерения в зоне северного сияния, масса 5.5 кг), пикоспутники DARPA, ARTEMIS, MASAT и STENSAT (США, спутники связи, запускались с микроспутника OPAL, масса по 0.25—0.5 кг), SNAP-1 (Великобритания, дистанционное зондирование Земли и радиосвязь, масса 2.5 кг) ANISAT (Мексика, телекоммуникации и исследование верхних слоев атмосферы, масса 0.5 кг) и др. Учеными NASA разработан проект запуска серии фемтоспутников — 25-мм дисков, содержащих по 12 транзисторов. Предполагается, что серия из таких микроспутников будет выведена на орбиту и развернута в пространстве для экспериментов, требующих одновременных измерений в различных пространственных точках (получение трехмерных изображений в реальном времени и пр.).

Разрабатываемые модификации унифицированных микроспутников в Украине ориентированы в первую очередь на проведение съемки подстилающей поверхности Земли и на наблюдение за движе-

нием океанских льдов. Поэтому в составе их бортового оборудования должны быть предусмотрены малогабаритные телекамеры видимого диапазона и специальная радиоаппаратура для передачи информации на наземные приемные средства.

Известно два способа потенциального увеличения надежности микроспутников при сохранении или даже существенном снижении их стоимости. Первый способ ориентируется на оптимизацию архитектуры спутника: все электронные части, системы контроля и элементы питания изготавливаются непосредственно в одном месте, на одном чипе. Специалисты прогнозируют, что за счет использования СБИС-технологии, а также за счет сокращения числа спутниковых компонентов, длин соединительных кабелей и звеньев может быть существенно увеличена надежность спутника, снижены его размеры, масса и энергопотребление, что сильно удешевит стоимость космического аппарата. Второй способ предполагает использование микроэлектромеханических систем (MEMS) и современных достижений нанотехнологии для спутниковой сборки. Как инженерная дисциплина, молекулярная нанотехнология обещает революционные продвижения не только в производстве отдельных компонентов микроспутников, но и в организации самого процесса их производства. Внедрение нанотехнологических разработок дало бы реальную возможность значительных усовершенствований в широком спектре космических приложений (например, датчики и приводы космического аппарата могли быть значительно уменьшены в размере и массе), продлевая тем самым жизнь космического аппарата и увеличивая вероятность успешного завершения миссии.

Распределенные системы из наноспутников откроют принципиально новые возможности для пространственного зондирования Земли и планет Солнечной системы. Запуск таких «облаков» позволит подойти к решению целого класса задач, еще недоступных сегодня (наноспутниковые интерферометры со сверхдлинной базой и др.). В перспективе ожидается, что такие наноспутники будут собираться подобно современным компьютерным чипам, что в существенной мере уменьшит общую стоимость космической миссии. Перспективы и выгоды от внедрения нанотехнологии в космическую отрасль будут рассмотрены ниже.

3. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Современная технология развивается в направлении постепенного уменьшения размеров отдельных

функциональных элементов. Уже сейчас достигнут уровень, когда размеры некоторых механических устройств, не говоря уже об электронных, составляют доли микрона. Однако по мере последующего продвижения в нанометровый диапазон физические принципы функционирования приборов существенно изменятся. Это наиболее ярко проявляется в электрических свойствах материалов, например, удельное сопротивление проводов нанометровой толщины может принимать лишь дискретные значения, кратные 12.9 кОм [18].

Создание и изучение новых материалов, размеры которых в одном, двух, либо в трех измерениях имеют порядок единиц нанометров, являются основой для разработки принципиально новых и сверхминиатюрных приборов новых поколений для наноспутников. Ниже мы останавливаемся на наиболее важных и перспективных космических материалах.

3.1. Проводящие полимеры. Еще 20 лет назад исследователи имели дело главным образом с полимерами, которые могут быть переведены в проводящее состояние лишь в результате коренного изменения их строения (например, путем резкого увеличения их температуры). Однако открытие в 1977 г. высокой металлической проводимости поликацетилена при введении небольших концентраций примесей (допантов) в полимерную матрицу стимулировало работы по синтезу и исследованию различных типов молекул, состоящих из повторяющихся звеньев — мономеров. В результате в настоящее время появился обширный класс многообещающих полимерных проводников [9].

Проводящие полимеры относятся к классу синтетических материалов. Эти материалы обладают электрическими, магнитными и оптическими свойствами металлов, но сохраняют при этом механические свойства обычных полимеров. Основой для получения таких проводящих материалов служат полисопряженные полимеры — плоские линейные молекулы с чередующимися двойными и одинарными связями. Они изначально обладают слабой электронной проводимостью порядка 10^{-10} См/см, которая резко увеличивается при дипировании полимера — на 5—10 порядков для небольших концентраций примесей и вплоть до 10^5 См/см для сильно дипированных полимеров. Таким образом, варьирование концентраций примесей позволяет получать материалы с проводимостью различных типов.

Разнообразие необычных физико-химических свойств проводящих полимеров и многообещающие перспективы их применений привлекают постоянно растущий интерес исследователей космоса. К достоинствам таких материалов, в первую очередь, сле-

дует отнести их легкость, гибкость, долговечность, стабильность, малые габариты и энергопотребление, электронную совместимость с ныне существующими приборами обработки информации, а также их низкую трудоемкость изготовления и цену.

Электропроводность полимеров весьма чувствительна к внешним химическим реагентам, что позволяет конструировать на их основе разнообразные датчики контроля неорганических (NO , CO_2 , CO , NH_3 , H_2S) и органических (ацетон, метanol, этанол) веществ [1].

Гибкие пленки из проводящих полимеров можно использовать в качестве электромагнитных экранов для различных спутниковых подсистем. Например, пленка из полипарафенилена толщиной в 50 мкм обеспечивает коэффициент затухания электромагнитной волны 30 дБ [1].

Свойство проводящих полимеров обратимо изменять свой объем в пределах от 1 до 100 % при электрохимическом дипировании можно использовать для создания «электрохимических мускулов». Эти механизмы создаются на основе бислойных полосок, состоящих из слоя какого-либо проводящего полимера и непроводящего полиэтиленового слоя. При дипировании незакрепленный конец полоски сильно отклоняется от исходного положения за счет разности изменения объемов в каждой из полосок и возвращается обратно при дедипировании [1].

Пленки из проводящих полимеров используют в качестве катодов полевой эмиссии с очень низким энергопотреблением. Так, тонкие пленки из поликваситофена, депозированные на *n*-дипированный кремний, эмиттируют электроны в вакуум при ультранизком электрическом поле (0.03—0.3 В/мкм) [33].

Сопряженные полимеры — новый класс химических веществ, которые изменяют цвет под влиянием электрического поля — это нечто новое, что не может делать полупроводниковый кремний. На таких электролюминесцентных полимерах уже создают принципиально новый вариант матричного дисплея, более дешевый, чем жидкокристаллический и не уступающий ему по качеству. Дисплей состоит из одного или нескольких полимерных слоев, расположенных между двумя электродами, один из которых прозрачен для света. Прикладываемая к электродам малая разность потенциалов приводит к излучению света полимером. Цвет излучения определяется структурой полимера каждого слоя и может быть проварирован в широких пределах.

Большие применения в космической технике найдет новый класс электролюминесцентных пленок на основе полипарафениленов. Такие пленки,

облучаемые УФ-лучами, испускают зелено-голубой свет $\lambda = 490$ нм, обеспечивая при этом очень высокую квантовую эффективность переизлучения — 65 % [16].

3.2. Фуллерены и углеродные нанотрубки. Открытие фуллеренов в 1985 г. (Нобелевская премия по химии за 1996 г.) и последовавшая за этим разработка технологии их получения в макроскопических количествах [6], дали начало систематическим исследованиям свойств углеродных слоев, состоящих из периодически повторяющихся правильных шестиугольников. В молекуле фуллерена атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников и пятиугольников, регулярным образом покрывающих поверхность сферы или сфераоида. Наиболее распространенной и детально изученной из молекул, из семейства фуллеренов является молекула C_{60} , структура которой соответствует правильному усеченному икосаэдру (рис. 1). Ее поверхность выложена 20 правильными шестиугольниками и 12 правильными пятиугольниками, так что каждый шестиугольник граничит с тремя пятиугольниками и тремя шестиугольниками. Наряду с C_{60} , к классу фуллеренов относятся и другие замкнутые молекулы, например, C_{70} , C_{76} , C_{78} , C_{84} , C_{240} и др., отличающиеся более низкой симметрией и большим числом шестиугольников [19].

Фуллерены представляют собой единственную растворимую форму углерода из трех ныне известных его модификаций (алмаз, графит, фуллерен). Они проявляют ярко выраженные акцепторные свойства (т. е. обладают способностью принимать электроны). Например, молекула C_{60} может принимать до 12 электронов и отдавать один электрон (т. е. заряд на молекуле может изменяться от +1 до -12). Поэтому фуллерены — это акцепторы нового поколения ибо, в отличие от других ранее известных акцепторов-молекул, обладают большими раз-

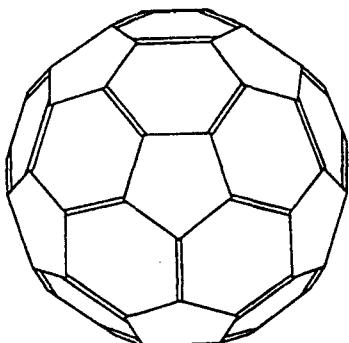


Рис. 1. Наиболее распространенная форма фуллерена — молекула C_{60}

мерами, высокой симметрией и поляризуемостью. Комбинации проводящих полимеров с фуллеренами C_{60} дают возможность осуществить эффективный фотоперенос и разделение зарядов на большие расстояния и с большим временем жизни [6]. Это значительно увеличивает фотопроводимость полимерных материалов и может быть использовано для создания высокоэффективных фотопреобразователей солнечной энергии.

Материалы, основанные на фуллерене C_{60} и додированные калием (тонкая пленка K_3C_{60} , точная геометрическая структура пока неизвестна), очень чувствительны к влажности и изменяют проводимость на три порядка при увеличении относительной влажности от 0,1 до 100 %. Следует отметить также быстроту реагирования пленки на изменение влажности. Например, может быть отслежено дыхание человека, удаленного на 30 см от пленки [35].

Наряду со сфероидальными структурами, графитовый слой может также образовывать и протяженные структуры в виде однослойных либо многослойных трубок. Длина таких образований, получивших название «нанотрубок» (рис. 2), достигает нескольких десятков микрон, что на несколько порядков превышает их диаметр, обычно составляющий 5—20 нм.

Нанотрубки фактически представляют собой новую квазидимерную (1D) форму углерода, занимающую вакантное место в ряду других известных форм углерода различной размерности 3D (алмаз),

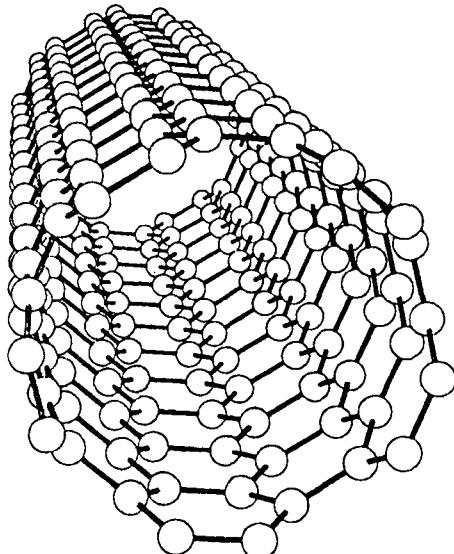


Рис. 2. Схема однослойной углеродной нанотрубки с открытыми концами

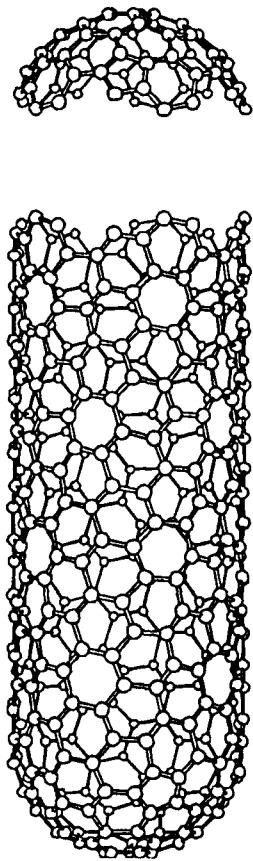


Рис. 3. Однослойная углеродная нанотрубка, заканчивающаяся двумя полусферическими головками

2D (графит), 0D (фуллерен). С обоих концов нанотрубки обычно заканчиваются полусферическими головками, напоминающими половину молекулы фуллерена (рис. 3). Различие в химической активности цилиндрической стенки нанотрубки и ее сферической головки позволило создать «химические» методы управления параметрами нанотрубки. Использование этих методов, например, позволяет синтезировать нанотрубки с открытыми концами, а также семейство однослойных нанотрубок одинакового радиуса.

Интерес к нанотрубкам, в первую очередь, вызван тем, что они сочетают в себе свойства молекул и твердого тела, и могут быть как проводниками, так и полупроводниками даже без допирования и при одном и том же диаметре трубы. Это происходит потому, что в цилиндрическом графитовом слое энергетический интервал между заполненными и вакантными электронными состояниями (запрещенная зона) зависит от хиральности нанотрубки (угла между образующей нанотрубки и направле-

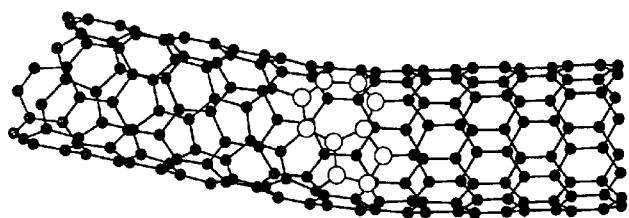


Рис. 4. Гетеропереход на основе однослойной нанотрубки с различной хиральностью по разные стороны от дефекта пятиугольник—семиугольник, показанного светлыми кружками

нием, в котором соседние шестиугольники имеют общую сторону). В зависимости от своей хиральности нанотрубка может быть либо полуметаллом, не имеющим запрещенной зоны как графит, либо полупроводником с шириной запрещенной зоны в диапазоне 0.01—0.7 эВ, либо обладать металлической проводимостью.

Соединение двух (или нескольких) нанотрубок, имеющих одинаковый диаметр, но разную хиральность, представляет собой многообещающий вариант нанометровых *p-n*-переходов в электронных устройствах нового поколения. Например, внедрение в идеальную нанотрубку смежной пары пятиугольник—семиугольник (рис. 4), может изменить ее хиральность по разные стороны от данного дефекта. Результат внедрения двух таких пар в разных местах нанотрубки можно рассматривать как гетеропереходы типа металл—полупроводник—металл либо как гетеропереходы полупроводников с различными ширинами запрещенной зоны [13, 40].

Сфера применения нанотрубок не ограничивается областьюnanoэлектроники. Нанотрубки могут служить основой тончайшего измерительного инструмента, используемого для контроля неоднородности каких-либо поверхностей на нанометровом уровне. Они могут быть использованы в качестве электропроводящего зонда для сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) с многообещающими перспективами. Уникальность таких зондов состоит в том, что нанотрубка испытывает изгиб лишь при превышении некоторого порогового усилия, а благодаря своим малым поперечным размерам (5—20 нм) нанометровый зонд позволяет проникать в углубления шириной 0.4 мкм и глубиной 0.8 мкм, недоступные для современных зондов.

При воздействии ультразвука на жидкую среду растворенные в ней углеродные нанотрубки обладают удивительной способностью сворачиваться в 400–600-нанометровые спирали, при этом доля выхода спиралевидных нанотрубок близка к 50 %. Это открывает возможность использования нанот-

рубок такого типа для магнитных измерений [30].

Нанотрубки обладают рядом интересных свойств, которые трудно ожидать от обычных объектов нанометровых размеров. Например, нанотрубки с открытым концом проявляют капиллярный эффект и способны втягивать в себя расплавленные металлы и другие жидкые вещества. При этом нанотрубку, заполненную проводником, полупроводником, либо сверхпроводником, можно рассматривать не только как самый миниатюрный из всех ныне существующих элементов микроэлектроники, но и в качестве основного элемента для гироскопов навигационных приборов. Наилучшими металлами для нанопроволок служат хром и гадолиний, которые образуют наиболее длинные и совершенные проволоки.

Необходимо также отметить чрезвычайно высокую механическую прочность нанотрубок, их модуль Юнга в поперечном направлении составляет порядка 7000 ГПа, в то время как для стали и иридия значение этого параметра соответственно составляет 200 и 520 ГПа [3].

В основе многих технологических применений многослойных (т. е. вложенных друг в друга) нанотрубок лежит их высокая удельная поверхность ($600 \text{ м}^2/\text{г}$). Углеродные материалы из случайнным образом расположенных нанотрубок обладают значительным количеством полостей нанометрового размера, доступных для проникающих извне жидкостей и газов. Это открывает возможность применения таких структур в качестве пористых материалов для фильтров и накопителей—анализаторов. Высокая удельная поверхность нанотрубок используется в роли электродов для высокочувствительных и легких электрохимических конденсаторов большой удельной мощности. К достоинствам таких электродов, недостижимых при использовании традиционных материалов, следует отнести их высокоразвитую пористую структуру, доступную для электролита, большую удельную поверхность, а также высокую химическую и термическую стабильность. Так, полный объем пор для структур из многослойных нанотрубок составляет $0.79 \text{ см}^3/\text{г}$, а средний диаметр пор — 9.2 нм, и хотя величина удельной поверхности материала ($450 \text{ м}^2/\text{г}$) ниже соответствующего значения для активированного угля ($1000 \text{ м}^2/\text{г}$), отсутствие микропор делает эту поверхность значительно более доступной для электролитов [5]. Более того, практически вся запасенная в таком конденсаторе энергия может быть извлечена без потерь при частотах ниже 100 Гц. Это оставляет далеко позади другие аналогичные устройства, не содержащие нанотрубок, типичное значение предельной частоты для которых не превышает 6 Гц. Следует также отметить и высокие

энергетические параметры нанотрубочных конденсаторов (8 кВт/кг при удельном энергосодержании 1.5 кДж/кг), что заставляет относиться к последним как к высокоэффективным устройствам, пре-восходящим лучшие современные коммерческие образцы [3].

Особые «экологические» ожидания связаны с развитием и реализацией методов заполнения нанотрубок различными опасными материалами. При этом сама трубка может использоваться как в качестве носителя заполняющего материала, так и в роли изолирующей оболочки, предохраняющей данный материал от взаимодействия с окружающими объектами. В частности, широко обсуждается вопрос о применении углеродных нанотрубок для изоляции и хранения радиоактивных веществ либо химических отходов. Преимущества такого подхода связаны с тем, что радиоактивный материал или опасный для человека химический реагент, инкапсулированный внутрь нанотрубки, инертен в химическом отношении. Тем самым можно рассчитывать на повышенную безопасность этого способа хранения материала по сравнению с традиционными методами.

Большие перспективы возлагают и на создание технологии хранения газообразного водорода внутри углеродных нанотрубок и фуллеренов. Практическая реализация этой разработки может способствовать созданию высокоэффективных экологически безопасных космических полетов, ибо открывает возможность решения практически важной задачи безопасного хранения водорода, используемого в качестве топлива.

Материалы, основанные на нанотрубках, могут быть использованы в качестве хранилища газообразного водорода. Правда, в настоящее время для его эффективной адсорбции необходимы высокое давление его паров и высокие температуры. Так, многослойные нанотрубки, додированные литием, поглощают водород вплоть до 20 % своего веса в течение 3 ч при температуре 380°C , а калий-додированные многослойные нанотрубки — до 14 % своего веса при комнатной температуре. Правда, до сих пор остается непонятным, как водород может быть хемисорбирован в таком отношении, что на три водорода приходится только один углерод [15]. Интенсивность десорбции (выделения) водорода из материала, содержащего нанотрубки, примерно в 10 раз (при тех же температуре и давлении) превышает соответствующее значение для ныне используемого материала — активированного угля [12].

Ввиду того, что углеродная нанотрубка является атомно совершенной и имеет высокое отношение

длина—толщина (порядка 1000 и больше), она является идеальным укрепляющим волокном для композитных материалов. Так, обычные углеродные волокна рвутся при очень низком напряжении, не превышающем 1 % деформации, а полимерная матрица со внедренными в нее нанотрубками выдерживает деформацию 15 %. При исследовании же волокон с нанотрубками (5 % от общего веса) на предмет эластичности, модуля упругости и электропроводности обнаружено увеличение на 90 % по первому параметру, на 150 % — по второму и на 340 % — по третьему [17].

Исследователи также используют наполнители из нанотрубок для увеличения электропроводности полимеров, испускающих свет при пропускании электрического тока. Например, добавление 10 % нанотрубок в полипарафенилен (наиболее перспективный материал для светодиодов) приводит к увеличению его проводимости на 10 порядков и, к тому же, в два раза увеличивает интенсивность люминесценции [17].

Заполнение нанотрубок полупроводниками наночастицами открывает новые возможности в создании материалов с длительным послесвечением. Интересно отметить, что спектр флуоресцирующих наночастиц сильно зависит от их размеров, например, частицы диаметром 2 нм излучают зеленый свет, а частицы диаметром 4 нм — красный. Сигнал от обычных красителей быстро становится тусклым даже после продолжительного освещения, полупроводниковые же наночастицы, инкапсулированные в нанотрубки, дают более узкий и яркий спектр, и в некоторых случаях сохраняют свое свечение в 100 раз дольше обычных красителей [10].

Промышленное изготовление нанотрубок с использованием лазерной печи уже осуществлено в нанотехнологическом центре университета г. Хьюстона, США. Используемая технология позволяет получить до 60 г нанотрубок в неделю, при этом более 90 % конечного продукта составляют однослойные нанотрубки диаметром 12 нм. Стоимость самого материала приблизительно равна 2000 долларов за 1 г чистых нанотрубок и 100 долларам для нанотрубок с примесями. Пока это слишком дорого для многих перспективных приложений.

3.3. Самоассемблированные слои молекул. Самоассемблированные молекулярные слои (САМ) представляют собой совокупность плотно упакованных молекул одного типа, удерживаемых на поверхности металла своими концевыми группами (рис. 5). Они представляют собой многообещающий класс новых диэлектрических и мембранных материалов, полимерных покрытий и будут играть до-

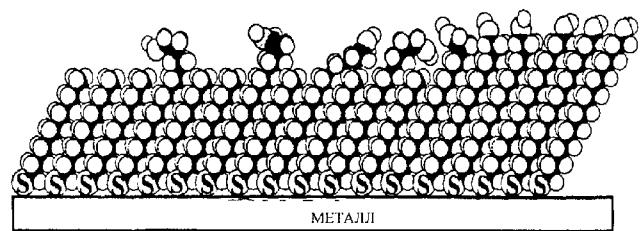


Рис. 5. Самоассемблированный слой молекул на поверхности металла

минирующую роль в компьютерных технологиях будущего, поскольку САМ являются прообразом электронных материалов с дефектно- и радиационно-защищенной архитектурой и распараллеливанием алгоритмов. В условиях микрографитации путем самоассемблирования молекулярных слоев могут быть получены структуры, которые не могут быть получены непосредственно на Земле.

Самоассемблированная смесь из различных полимеров является прекрасным образцом диэлектрического зеркала, способного избирательно отражать свет в определенных участках видимого диапазона. Такие зеркала обладают способностью менять свою форму и направлять отраженный свет в различных направлениях [38].

Самоассемблированные слои сопряженных молекул бензенотиола не пропускают электрический ток до определенного порога, после превышения которого наблюдается резкий рост тока, его насыщение и еще более резкое падение [15, 40]. При этом отношение максимума тока к его допороговому значению составляет три порядка. Такое необычное поведение тока, известное как отрицательное дифференциальное сопротивление, наблюдается при 150 К и весьма чувствительно к изменению температуры, например, при комнатной температуре это отношение составляет 1.5 : 1 [11]. Для сравнения отметим, что в известных на сегодняшний день полупроводниковых устройствах отношение максимума тока к его минимуму составляет 100 : 1.

О создании первых компонентов будущих молекулярных компьютеров на основе САМ уже сообщалось [26]. Например, на базе самосопряженных молекул ротаксана, заключенных в микронном зазоре между двумя электродами, созданы первый молекулярный транзистор и логические элементы «И», «ИЛИ».

Действие прибора основано на том, что молекула ротаксана имеет две конформации, различающиеся по длине молекулы, а сама молекула может легко переключаться из одной конформации в другую

под действием электрического сигнала, подаваемого на базу прибора. Поэтому сопротивление току, оказываемое самой молекулой и промежутком молекула—электрод, будет зависеть от конформации молекулы, и, как установлено на практике, различаться более чем в 15 раз [14].

4. ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРЫ «НАНОСПУТНИКОВ»

Будущие наноспутники будут в основном сохранять архитектуру современных микроспутников, но строиться на несколько иных технологиях сборки, позволяющих существенно снизить размер, массу и стоимость будущих наносателлитов.

В настоящее время для минимизации стоимости микроспутника и его массы часто отказываются от использования механических систем активной ориентации спутника. Однако, поскольку выведение будущих наноспутников на орбиту будет осуществляться методом группового запуска, их положение относительно орбиты в общем случае может оказаться произвольным. Поэтому в состав наноспутников (формирующих, например, интерферометры со сверхдлинной базой) предусматривается ввести двигательную установку для поддержания заданных параметров орбиты.

Чрезвычайно легкий наноспутник мог бы продвигаться и маневрировать на орбите, используя импульсные толчки от своей силовой установки. В настоящее время активно дискутируется вопрос использования солнечного паруса в качестве двигателя для наноспутника. Однако это имеет как преимущества, так и недостатки. Плюсом является то, что перемещение спутника можно осуществлять без использования движущихся механических частей, например, путем смещения центра масс при растяжении или сжатии опорных металлических нитей, нагреваемых от слабого электротока. Минус связан с геометрическими размерами будущего наноспутника. По оценкам [7] спутник массой в 250 г должен иметь солнечный парус площадью в 4 м².

В этой связи достаточно перспективным средством передвижения наноспутника является лазерный луч, посыпаемый с Земли на миниатюрный спутниковый парус. Целесообразным представляется использование терагерцового лазера с частотами, принадлежащими окнам прозрачности земной атмосферы. Энергия такого лазерного луча, посыпаемого на наноспутник, была бы идеальным средством для коррекции орбиты спутника, однако проблема точного наведения луча на спутник пока остается нерешенной.

В качестве миниатюрных навигационных гироскопов наиболее перспективными являются свернутые в спираль углеродные нанотрубки. Как показало моделирование, нанотрубка может вращаться в электрическом поле, создаваемом лазером [32]. И хотя до сих пор не решена задача устойчивости спиральных нанотрубок вне жидких сред, данные образования являются наиболее достойными преемниками микронных металлических гироскопов, разработанных в начале 1990-х гг.

Выход на орбиту микроспутников ракетами-носителями различных типов обуславливает необходимость защиты наиболее уязвимых частей наноспутника от теплового нагрева при запуске. В этой связи становится актуальным использование алмазо-титановых композитов для изготовления спутниковых корпусов. Существенное повышение удельной прочности новых материалов по сравнению с используемыми ныне материалами (по теоретическим оценкам до 75 раз) ожидается за счет использования бездефектных технологий [21]. Корпус перспективных наноспутников должен не только предохранять от холода, тепла и вакуума, но и функционировать как многосенсорная платформа и антenna, а при необходимости — изменять и свою форму.

Отдельные механические компоненты наноспутников будут изготавливаться из монокристаллов, приобретая особую прочность именно за счет уменьшения размеров. Например, нанокристаллы меди в пять раз тверже, чем медь микроразмерная.

Бортовой компьютер наноспутника должен быть дешевым, экономичным, жизнеспособным и будет собираться методами, пригодными для массового производства. В силу экстремальных космических условий (радиация, термический нагрев при запуске, вибрация и пр.) нынешние компьютерные узлы массового потребления не могут быть использованы для спутниковых приложений. Однако сейчас наблюдается четкая тенденция в сближении целей космической науки и сферы коммерческих продаж. Например, появление коммерческих портативных и карманных компьютеров и попытки их последующего удешевления стимулировали поиск дефектно защищенных вычислительных сред, обладающих низким энергопотреблением и малой массой. Все эти требования необходимы и для разработки наноспутников.

В настоящее время некоторые фирмы (UCLA, «Hewlett-Packard» и др.) разрабатывают распределенную дефектно-защищенную вычислительную среду с распараллеливанием алгоритмов. Данный компьютер содержит 220 тысяч дефектов (приблизительно 3 % от общего числа элементов), и тем

не менее, работает в 100 раз быстрее современных однопроцессорных компьютеров. Его дефектно-защищенная архитектура снабжена бесчисленным множеством возможных путей следования информационных потоков, что позволяет информации «огибать» дефекты. Использование принципов дефектно-защищенной архитектуры также позволит легко запрограммировать компьютер наноспутника для решения задач, недоступных современным вычислительным машинам [26].

Однако существуют практические ограничения на размеры наноспутников, связанные с накоплением солнечной энергии (нельзя беспредельно уменьшать площадь солнечных батарей), с ее хранением (существует предел для объемов конденсаторов и аккумуляторов), с радиационной безопасностью (нельзя существенно уменьшать толщину защитного слоя для радиационно-чувствительных элементов), с требованиями к разрешающей способности оптических элементов у выносимого оборудования либо к диаметру приемно-передающей антенны.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКУЮ ОТРАСЛЬ

Внедрение достижений нанотехнологии в космическую индустрию является комплексной и долговременной задачей. На начальном этапе предполагается активное использование новых материалов и молекулярных структур (нанотрубок и молекулярных слоев). Важно также подчеркнуть, что первые поколения наноэлектронных устройств могут быть созданы только в современных лабораториях в единичных экземплярах. Поэтому они будут иметь высокую цену и недостаточную космическую надежность. Понижение цены и повышение надежности возможно лишь после соответствующей коммерциализации изделия и через определенное время.

Важной задачей текущего десятилетия является также сбор, обработка и анализ данных по созданию новых сверхтвердых материалов с высокорегулярной структурой, сверхбыстрых электронных приборов с низким энергопотреблением, экзотических химических веществ с уникальными свойствами и пр. Огромное внимание уделяется возможностям сканирующего тунNELьного микроскопа (СТМ) и открывающимися при этом перспективам создания атомно-молекулярных структур с наперед заданными свойствами.

Основой такой СТМ-сборки является возможность размещать атомы в определенном порядке и

манипулировать ими, как это уже было эффективно продемонстрировано фирмой IBM [24]. Ожидается, что использование возможностей других технологий, особенно биохимии, биотехнологии и микролитографии, позволит стремительно уменьшить стоимость материалов, создаваемых с помощью тунNELьных микроскопов, вплоть до 1 долл./кг. При этом будет достигнута высокая степень совершенства молекулярных структур, особенно объемных молекул (типа нанотрубок), что откроет доступ к изучению сложных и тонких физических эффектов на геометрически совершенных материалах.

Интерес к сканирующим тунNELьным микроскопам вызван и долгосрочными выгодами от молекулярной нанотехнологии, в частности возможным использованием СТМ для создания «молекулярного ассемблера» Дrexслера [20—22]. Молекулярный ассемблер (сборщик) состоит из двух основных компонент — микрокомпьютера и управляемого манипулятора. Он представляет собой наноробот с памятью, где хранится управляющая программа, и с исполнительным механизмом, который непосредственно располагает атомы в соответствии с этой программой. По своей сути ассемблер является молекулярной модификацией способного к воспроизведению клеточного автомата фон Неймана. Ожидается, что первый молекулярный ассемблер будет создан с помощью тунNELьного микроскопа, а впоследствии каждая копия будет создавать свою копию, так что число ассемблеров увеличится экспоненциально. Специалистами прогнозируется [4], что к 2025 г., или даже ранее, ассемблеры дадут возможность получать молекулярные последовательности и структуры с наперед заданными свойствами, что может быть использовано для создания протяженных объектов, наподобие космических антенн, для сооружения научно-исследовательских станций вне пределов Земли и для прочих целей.

Однако концепция молекулярного ассемблера не является совершенной для получения новых макроскопических материалов с высокорегулярной периодической структурой (например, для создания сверхпрочных и сверхлегких микроспутниковых корпусов), поскольку это требует одновременного синхронного управления огромным количеством ассемблеров. Эти соображения привели к необходимости поиска и создания конфигураций молекул, способных образовывать «самоорганизующиеся» структуры без непосредственного участия молекулярных сборщиков (например, за счет теплового движения молекул, химической адсорбции и пр.). Впоследствии это понятие «самосборки» было расширено до так называемой «конвергентной сборки». Последняя, в отличие от традиционных технологи-

ческих процессов, предусматривает удвоение размера создаваемого изделия на каждом технологическом этапе сборки путем соединения идентичных блоков меньших размеров. При операциях на атомно-молекулярном уровне время выполнения одной технологической операции чрезвычайно мало — примерно 100 нс, и допустима высокая степень конвейеризации операций на последующих этапах. Поэтому, несмотря на малый (атомарный) объем исходного блока, полная сборка, например, габаритного изделия размером 1 м составит несколько десятков минут, что весьма мало для современных роботизированных производств [4].

За счет конвергентной сборки предполагается создавать изделия из бездефектных высокорегулярных структур, и это позволило обосновать перспективность нанотехнологий в промышленном производстве дешевых космических материалов с необычными свойствами. Именно по этой причине активные нанотехнологические исследования ведутся сейчас во многих подразделениях NASA. После успешного освоения углеродных нанотрубок и самоассемблированных молекулярных слоев аэрокосмическая промышленность крайне заинтересована в сверхпрочных и сверхлегких материалах новых поколений.

В силу каких-либо, до сих пор неизвестных, закономерностей микромира, существует, конечно, определенная вероятность того, что универсальные ассемблеры Дрекслера, либо какой-либо этап конвергентной сборки, не смогут быть осуществлены в принципе. Однако в течение десятилетия с момента принятия основных принципов молекулярной технологии никто не выдвинул весомых аргументов в пользу нереальности этих концепций. Отсутствие достойных аргументов может быть объяснено и тем, что все окружающие нас органические существа были созданы эволюцией подобным образом (от меньшего к большему, от простого к сложному), и что долгосрочные тенденции в развитии нанотехнологии показывают стремительное увеличение глубины проникновения в микромир и степени его управления.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ состояния и перспектив внедрения нанотехнологии в космическую индустрию показывает, что нанотехнология может существенно продвинуть изучение и темпы освоения космического пространства. Существующие технологии, по существу, ограничивают возможности производства малогабаритных, надежных и доступных по средствам кос-

мических систем. В то же время молекулярная нанотехнология имеет неограниченные возможности для создания новых космических архитектур с улучшенными характеристиками и надежностью при сравнительно небольшой стоимости.

Сверхмалые и недорогие навигационные системы на основе углеродных нанотрубок, сети из распределенных встроенных датчиков на основе проводящих полимеров, миниатюрные компьютеры с распараллеливанием алгоритмов на базе самоассемблированных слоев молекул являются многообещающими приборами для контроля механических напряжений, температурных градиентов они могут быть анализаторами давления и падающего излучения, гарантировать безопасность миссии и оптимальность управления космическим аппаратом.

1. Верницкая Т. В., Ефимов О. Н. Полипиррол как представитель класса проводящих полимеров // Успехи химии.—1997.—66, № 5.—С. 489—505.
2. Грицик В. В. Інформаційні технології і системи в космічних дослідженнях: стан і перспективи // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 4.—С. 3—20.
3. Езерский А. В. Углеродные нанотрубки // Успехи физ. наук.—1997.—167, № 9. —С. 945—972.
4. Зубинский А. Нанотехнология — овеществление вычислений, программируемая материя // Компьютерное обозрение.—1999.—№ 42.—С. 38—42.
5. Ивановский А. Л. Моделирование нанотубулярных форм вещества // Успехи химии.—1999.—68, № 2.—С. 119—135.
6. Конарев Д. В., Любовская Р. Н. Донорно-акцепторные комплексы и ион-радикальные соли на основе фуллеренов // Успехи химии.—1999.—68, № 1.—С. 23—44.
7. Помазанов М. В., Егоров В. А. Солнечный парус: принципы конструкции, управление и перелеты к астероидам // Космические исследования.—1999.—37, № 4.—С. 397—404.
8. Солдатов Е. С., Ханин В. В., Трифонов А. С. Молекулярный одноэлектронный транзистор, работающий при комнатной температуре // Успехи физ. наук.—1998.—168, № 2.—С. 217—219.
9. Bredas J. L., Silbey R. Conjugated Polymers. — Dordrecht: Kluwer, 1991.—522 p.
10. Bruchez M. (Jr.), Moronne M., Gin P., et al, Semiconductor Nanocrystals as Fluorescent Biological Labels // Science.—1998.—281.—P. 2013—2016.
11. Chen J., Reed M. A., Rawlett A. M., et al. Large On-Off Ratios and Negative Differential Resistance in a Molecular Electronic Device // Science.—1999.—286.—P. 1550—1552.
12. Chen P., Wu X., Lin J. High H₂ Uptake by Alkali-Doped Carbon Nanotubes Under Ambient Pressure and Moderate Temperatures // Science.—1999.—285.—P. 91—93.
13. Chikio L., Benedict L. X., Louie S. G., et al. Quantum Conductance of Carbon Nanotubes with Defects // Phys. Rev. B.—1996.—54, N 4.—P. 2600—2606.
14. Collier C. P., Wong E. W., Belohradsky M., et al. Electronically Configurable Molecular-Based Logic Gates // Science.—1999.—285.—P. 391—394.
15. Dagani R. Carbon-Based Electronics // Chemical & Engineering News.—1999. —November 22.—P. 11—12.
16. Dagani R. Light-Emitting Polymer Synthesis // Chemical &

- Engineering News.—1998.—January 19.—P. 9—10.
17. Dagani R. Putting the «Nano» into Composites // Chemical & Engineering News.—1999.—June 7.—P. 25—37.
 18. Datta S. Electronic Transport in mesoscopic systems. — Cambridge: Univ. press, 1992.—377 p.
 19. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Eklund P. C. Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes. — San-Diego: Academic press, 1996.—520 p.
 20. Drexler K. E. Molecular engineering: an approach to the development of general capabilities for molecular manipulations // Proc. National Academy of Sciences USA.—1988.—78.—P. 5275—5278.
 21. Drexler K. E. Molecular manufacturing for space systems: An overview // J. Brit. Interplanet. Soc.—1992.—45.—P. 401—405.
 22. Drexler K. E. Nanosystems: Molecular Machinery // Manufacturing, and Computation: John Wiley and Sons, 1992.—452 p.
 23. Ebbesen T. W. Carbon Nanotubes. Preparation and Properties. — Finland, Boca Raton: CRC Press.—1997.—225 p.
 24. Eigler D., Schweizer E. Positioning Single Atoms with a Scanning Tunneling Microscope // Nature.—1990.—344.—P. 524—526.
 25. Hanson D. J. NASA at 40: Science Looks Up // Chemical & Engineering News.—1998.—March 16.—P. 21—23.
 26. Heath J. R., Kuekes P. J., Snider G. S., et al. A Defect-Tolerant Computer Architecture: Opportunities for Nanotechnology // Science.—1998.—280.—P. 1716—1721.
 27. Hsieh B. R., Yu Y., Forsythe E. W., et al. A New Family of Highly Emissive Soluble Poly(p-phenylene vinylene) Derivatives. A Step toward Fully Conjugated Blue-Emitting Poly(p-phenylene vinylenes) // J. Amer. Chem. Soc.—1998.—120, N 1.—P. 231—232.
 28. Kohler A., dos Santos D. A., Beljonne D., et al. Charge Separation in Localized and Delocalized Electronic States in Polymeric Semiconductors // Nature.—1998.—392.—P. 903—906.
 29. Kong J., Franklin N. R., Zhou C., et al. Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors // Science.—2000.—287.—P. 622—625.
 30. Martel R., Shea H. R., Avouris P. Ring Formation in Single-Wall Carbon Nanotubes // J. Phys. Chem. B.—1999.—36, N 103.—P. 7551—7556.
 31. Merkle R. Computational Nanotechnology // Nanotechnology.—1991.—2, N 3.—P. 134—141.
 32. Merkle R. Self Replicating Systems and Molecular Manufactur-
 - ing // J. Brit. Interplanet. Soc.—1992.—45, N 10.—P. 407—413.
 33. Musa I., Munindrasdasa D. A. I., Amaratunga G. A. J., et al. Eccleston Ultra-low-threshold field emission from conjugated polymers // Nature.—1998.—395.—P. 362—365.
 34. Robinson E. Y., Helvajian H., Janson S. W. Big Benefits from Tiny Technologies // Aerospace Amer.—October 1996.—P. 38—43.
 35. Saab A. P., Laub M., Srđanov V. I., et al. Oxidized Thin Films of C60: A New Humidity-Sensing Material // Adv. Mater.—1998.—10, N 6.—P. 462—465.
 36. Sariciftchi N. S. Role of Buckminsterfullerene C60. in Organic Photoelectric Devices // Prog. Quant. Electr.—1995.—19.—P. 131—159.
 37. Tans J. S., Verschueren A. R. M., Dekker C. Room-Temperature Transistor Based on a Single Carbon Nanotube // Nature.—1998.—393.—P. 49—51.
 38. Urbas A., Fink Y., Thomas E. L. One-Dimensionally Periodic Dielectric Reflectors from Self-Assembled Block Copolymer-Homopolymer Blends // Macromolecules.—1999.—32, N 14.—P. 4748—4750.
 39. Wong S.S., Joselevich E., Woolley, et al. Covalently Functionalized Nanotubes as Nanometer-Sized Probes in Chemistry and Biology // Nature.—1998.—394.—P. 52—55.
 40. Yao Z., Postma H. W. C., Leon B., et al. Carbon nanotube intramolecular junctions // Nature.—1999.—402.—P. 273—276.

STATE AND PROSPECTS OF CREATING NEW GENERATION MICROSATELLITES: NEW MATERIALS, NANOTECHNOLOGY AND ARCHITECTURE

Yu. A. Klymenko, O. K. Cheremnykh,
V. A. Yatsenko, and N. V. Maslova

Recent advances in the micro- and nanotechnologies for innovative space missions are reviewed. Capabilities, limitations and applications of the micro system technology are discussed. The following aspects are considered: concepts of microsatellites, new nanomaterials (fullerene, tubules, molecular devices, conducting polymers), and information hardware. The prospects for the development of molecular manufacturing for space industry are analysed.