

**УЧИТЕЛИ**  
**РАДИОТЕХНИКИ**  
**СОВРЕМЕННОЙ**  
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**  
**9' 2010**

**В номере:**

**Выдающиеся ученые России**  
**Академик РАН**  
**Юрий Васильевич**  
**Гуляев**



Тел./факс: (495) 625-9241  
E-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)  
<http://www.radiotec.ru/>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70325 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА "РОСПЕЧАТЬ": ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

## Микро - и наноэлектроника применительно к системам радиолокации и радиосвязи

© Авторы, 2010

**Р.П. Быстров**

д.т.н., проф., вед. научн. сотр. Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.  
E-mail: rudolf@cplire.ru

**Ю.В. Гуляев**

академик РАН, директор Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.  
E-mail: ire@cplire.ru

**С.А. Никитов**

чл.-корр. РАН, зам. директора Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.  
E-mail: ire@cplire.ru

**А.В. Соколов**

По материалам отечественных и зарубежных источников рассмотрены некоторые вопросы в области исследований микро- и наноэлектроники в части особенностей развития углеродных нанотрубок как структуры новых материалов в радиофизике применительно к системам радиолокации и радиосвязи.

**Ключевые слова:** магнитосопротивление пленок; микро- и наноэлектроника; многослойные нанотрубки; нанокomпозитные покрытия; нанотехнологии; нанофотоника.

In the article, in a survey form, on domestic and foreign source materials individual questions in the field of researches of micro- and nanoelectronics regarding features of development of carbon nanotubes as structures of new materials in the radio physics with reference to radar- and radio communication systems are considered.

**Keywords:** magnetoresistance of films; micro- and nanoelectronics; multilayered nanotubes; nanocomposite coverings; nanotechnology; nano-photonics.

### Введение

Одно из наиболее активно развивающихся направлений нанотехнологии связано с разработкой конструкционных и функциональных материалов [1, 2]. В настоящее время в науке и технике бурно развивается новое направление, позволяющее реализовывать новые поколения электронных устройств с улучшенными и даже с неизвестными прежде свойствами. Развитие микроэлектроники приводит к появлению все более сложных и быстродействующих схем, размеры элементов которых уже меньше 100 нм. Созданы лабораторные образцы транзисторов с длиной затвора 10 нм.

В настоящее время развиваются технологии и системы нанотехнологии, принцип действия которых основан на квантовых эффектах и эффектах межмолекулярных взаимодействий. Проводимые исследования уже сейчас дают практические результаты.

Нет сомнения, что в современном мире проблемам исследования в области нанотехнологий и наноматериалов применительно к решению насущных промышленно-экономических проблем различной категории и сложности уделяется огромное внимание. Область исследований в реали-

зации нового поколения электронных устройств охватывает широкий круг задач, имеется исключительно большое число научно-технических отечественных и зарубежных источников, посвященных уникальным результатам в развитии микроэлектроники.

В Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова совместно с Саратовским филиалом института исследования в области развития углеродных нанотрубных структур как новых материалов для эмиссионной электроники проводятся с конца 80-х годов [3 – 7] и др. Первые работы в России по синтезу углеродных нанотруб и пленок из них были выполнены в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в 1991 г. Тогда же были начаты исследования их физических свойств и изучение перспектив применения нанотруб в микро- и наноэлектронике. В итоге коллективом ИРЭ РАН (научные руководители – академик Ю.В. Гуляев, доктора физ.-мат.наук Н.И. Сеницын и А.Л. Мусатов, канд. физ.-мат. наук З.Я. Косаковская в период 1991 – 2003 гг. были выполнены следующие работы [8].

1. Разработан оригинальный метод синтеза однослойных и многослойных углеродных нанотруб в



условиях автокатализа при электронно-лучевом испарении чистого графита в вакууме. Метод позволяет на различных подложках большого диаметра в едином процессе формировать пленки из хорошо ориентированных нанотруб, практически свободных от примесных частиц, управлять ориентацией нанотруб в пределах углов  $60 - 90^\circ$ , синтезировать нанотрубы, состоящие из двух и более участков, имеющих различную хиральность. Впервые этим методом синтезированы однослойные углеродные нанотрубы диаметром  $0,6 - 1,3$  нм длиной  $0,5$  мкм, а также хорошо ориентированные пленки из однослойных нанотруб на подложках диаметром до  $100$  мм из стекла, кварца, графита и никеля, из смеси однослойных и многослойных нанотруб на подложках кремния и стали из многослойных нанотруб диаметром  $2 - 15$  нм на подложках Ge, KBr,  $YAlO_3$ ,  $LiNbO_3$ . Впервые синтезированы однослойные нанотрубы с *p-n*-переходом и измерены их диодные характеристики.

2. Обнаружены способность самопроизвольно легирования закрытых однослойных и многослойных нанотруб элементами материала подложек даже при комнатной температуре, а также сильное влияние нанотрубной пленки на перераспределение примесей в при поверхностном слое подложки.

3. Впервые методом электронно-лучевого испарения графита в вакууме был изготовлен катод из однослойных и многослойных нанотруб и проведено комплексное исследование его полевой эмиссии, показавшее огромную перспективность данного материала для матричных катодов плоских дисплеев и СВЧ-устройств.

4. Разработаны низковольтные планарные электронные эмиттеры на основе углеродных слоев с нанотрубками, выращенными методом химического осаждения углерода из газовой фазы. Для данного эмиттера плотность тока  $10$  мА/см<sup>2</sup> достигается при среднем электрическом поле  $1,5 - 2,2$  В/мкм (результат получен совместно с Казанским физико-техническим институтом РАН).

5. Впервые наблюдался гистерезис магнитосопротивления пленок, состоящих из однослойных нормально ориентированных нанотруб в слабых магнитных полях (до  $0,2$  Тл) при комнатной температуре. Измерения временной зависимости изменения сопротивления после воздействия на нанотрубы магнитного поля показало большие времена релаксации (для возвращения сопротивления образцов в исходное состояние требуется их выдержка при комнатной температуре в течение примерно двух недель).

6. Впервые в пленках из ориентированных однослойных нанотруб, находящихся под гидростатическим давлением  $0,3$  ГПа, наблюдалось падение сопротивления на  $6 - 7$  порядков в интервале температур  $250 - 340$  К (результат получен совместно с Итеа University, Швеция).

7. Впервые измерена скорость продольных акустических волн и проведена оценка величины модуля упругости и плотности углеродных нанотрубных пленок. Полученные значения составили:  $c_{33} = 1$  ТПа, значение плотности  $2,0 \pm 0,1$  г/см<sup>3</sup>. Экспериментально обнаружено изменение параметров пленки во времени, что может быть связано с диффузией атомов из подложки в пленку.

8. Впервые измерена высокая твердость нанотрубных пленок, близкая к алмазу, и отмечена их уникальная способность к самовосстановлению после деформации (результат получен совместно с Акустическим институтом РАН).

Исследовательские работы в данной области в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН успешно продолжаются.

Цель данной работы – на основе анализа результатов, изложенных в известных популярных научных материалах, имеющихся в наличии и связанных с решением указанных задач, показать возможности использования их в создании эффективных радиолокационных систем нового поколения на основе развития наноэлектроники и нанотехнологий.

В обзорной форме освещаются отдельные вопросы в области исследований микро- и наноэлектроники в части особенностей развития углеродных нанотрубок как структуры новых материалов в радиофизике применительно к системам радиолокации и радиосвязи.

В соответствии с Распоряжением Президиума РАН № 10 от 11. 07.2008 г. (По предложениям в проект Государственной программы вооружения на 2011 – 2020 гг. в раздел «Фундаментальные, прогнозные и поисковые исследования») в статье дается возможный вариант формулирования предполагаемых проблем и направлений в постановке научных работ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в области наноэлектроники применительно к системам радиолокации и радиосвязи на ближайшую перспективу. В заключении статьи на основе анализа зарубежных материалов по развитию углеродных нанотрубок приводятся сведения о состоянии таких работ за 2006-2009 годы за рубежом.

По мнению авторов, рассмотренные в статье материалы по полноте изложения в научно-тех-

нических направлениях и задачам, естественно, обладают определенной степенью условности, так как по своему содержанию они могут быть отнесены ко многим областям совершенствования радиоэлектронной аппаратуры. Тем не менее, подобранные материалы в настоящей статье могут быть полезными для инженеров и научных сотрудников, работающих в области создания и развития основных видов и типов радиолокационных систем.

### 1. Области применения материалов и структур в микро- и нанозлектронике

По данным иностранных источников ожидается, что применение нанотехнологий приведет к революционным изменениям в создании микроробототехнических комплексов различного назначения, принципиально изменит характер основных видов любой деятельности [9 – 13]. В целом нанотехнология имеет огромный потенциал для использования в чрезвычайно большом и разнообразном множестве практических областей – от производства более прочных и легких конструкционных материалов в машиностроении до уменьшения времени доставки наноструктурированных лекарств в кровеносную систему, увеличения объема памяти и быстрейшего действия компьютеров и т.д.

#### Многофункциональные нанокомпозитные покрытия

В [14] поясняется, что в последнее десятилетие на российском рынке оборудования для металлообработки широко представлена продукция большинства ведущих зарубежных производителей. Выбор такого оборудования огромен, и не всегда можно понять, в чем заключаются преимущества конкретного изделия в сравнении с аналогами.

Объясняется это тем, что импортные станки дорогие, а в себестоимость продукции заложена их амортизация. Кроме того, велики эксплуатационные затраты, значительную часть которых составляет стоимость импортных комплектующих и фирменное обслуживание. Такая ситуация сказывается на темпах роста производства отечественной высокотехнологичной продукции, в том числе в ОПК, однако, как свидетельствует практика, существует реальная возможность управления себестоимостью выпускаемой продукции с одновременным повышением ее качества.

Повышение эффективности обеспечивается в частности за счет перехода на интенсивные режимы металлообработки при использовании инстру-

мента с многофункциональными покрытиями. Такой подход уже апробирован и внедрен в производство ведущих предприятий развитых стран.

*Многофункциональные покрытия* обладают комплексом свойств, необходимых для работы инструмента на высокоскоростных режимах – высокими твердостью, вязкостью, термостойкостью, низким коэффициентом трения. Такой комплекс свойств обеспечивается за счет особой, нанокомпозитной структуры покрытий, представляющей собой нанокристаллитные керамические зерна, распределенные в аморфной или кристаллической матрице.

Большинство российских предприятий для металлообработки пока вынуждены приобретать обладающий вышеуказанными свойствами импортный инструмент однократного использования. Такой инструмент служит до первой перезагодки, поскольку без покрытия он не работает в требуемых режимах и выходит из строя, однако, как свидетельствует практика, если на него повторно наносится покрытие, инструмент можно использовать несколько раз. Покрытия наносятся в вакууме на автоматизированных установках, обеспечивающих воспроизводимость свойств создаваемых высококачественных покрытий.

Ведущие мировые производители вакуумных установок используют два способа нанесения нанокомпозитных покрытий: вакуумно-дуговой и магнетронный.

При *вакуумно-дуговом способе* покрытие формируется из высокоионизированной плазмы на металлическом катоде за счет энергии разряда электрической дуги. В дуговом разряде наряду с потоком ионов образуются микроскопические капли (частицы) металла, которые входят в состав наносимого на изделие покрытия. Такие включения увеличивают шероховатость, повышают трение, снижают коррозионную стойкость и нарушают структуру нанокомпозитного покрытия.

При *магнетронном способе* ионизированная плазма создается в результате бомбардировки металлической мишени ионами аргона. Осаждаемое на изделии покрытие формируется исключительно на атомарном уровне без каких-либо включений микрокапель. Преимущества магнетронного способа нанесения нанокомпозитных покрытий наиболее ярко проявляются при использовании «дуальных» магнетронных распылительных систем, состоящих из двух одинаковых и расположенных рядом под некоторым углом друг к другу магнетронов. Технология методов вакуумно-дугового и

магнетронного покрытий на примерах достаточно подробно показана в [14].

Здесь же приводится информация о ведущих организациях, занимающихся вопросами внедрения в производство методов многофункционального нанокompозитного покрытия.

В России ведущим производителем специализированных блоков импульсного питания магнетронов, включая блоки асимметричного питания, является фирма «Плазматех» (Москва).

Благодаря многолетнему сотрудничеству ООО «Плазматех» и НПФ «Элан-Практик» (г. Дзержинск) уже в 2003 г. было организовано производство современного промышленного оборудования для нанесения нанокompозитных покрытий, которое в настоящее время достаточно активно используется на ряде производств.

В качестве примеров приводятся возможности использования вакуумных установок НПФ «Элан-Практик», укомплектованных блоками питания ООО «Плазматех».

Использование для упрочнения металлообрабатывающего инструмента:

- на Московском монетном дворе упрочнение монетных штемпелей, в том числе для имеющих зеркальную поверхность ргооf-монет);

- ГосНИИМаш – упрочнение режущего инструмента и штампов;

- «КЭМЗ-Инструмент» – упрочнение режущего инструмента и штампов;

- Пермский государственный технический университет – упрочнение режущего инструмента;

- Московский институт стали и сплавов – упрочняющие покрытия на основе боридов.

Блоки питания ООО «Плазматех» и установки НПФ «Элан-Практик» с целью замены гальванопокрытий на нанокompозитные износ- и коррозионностойкие покрытия используют Чистопольский и Угличский часовые заводы, Ковровский электромеханический завод, Московский монетный двор, фирма LIW LEWANT (Польша).

В 2006 г. блоки питания ООО «Плазматех» были поставлены в Нижегородский инновационно-производственный центр «Нанокompозитные покрытия», который, эффективно решая задачу обработки титановых и жаропрочных сплавов, организовал мелкосерийное изготовление покрытий на инструмент заводов Нижегородского региона (ГАЗ, Гидромаш, Машзавод и др.), а также для НПО «Сатурн» и Уфимского машиностроительного ПО.

Таким образом, можно с уверенностью заключить, что одним из перспективных методов

повышения эффективности функционирования используемого в практике металлического инструмента является внедрение метода многофункционального нанокompозитного покрытия.

### Конструктивные и функциональные материалы

Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к *наноматериалам*, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними – к *нанотехнологиям* [9]. Для современных конструкционных материалов характерна такая закономерность: увеличение прочности приводит к снижению пластичности. Данные по нанокompозитам показывают, что уменьшение структурных элементов и более глубокое изучение физики деформационных процессов, определяющих пластичность наноструктурных материалов, могут привести к созданию новых типов материалов, сочетающих высокие прочность и пластичность. Например, нержавеющая сталь с нанокристаллической структурой получается из аустенитной стали путем формования методами сверхпластической деформации. По сравнению с обычной нержавеющей сталью новый материал обладает повышенной в 3 раза твердостью и может использоваться как конструкционный материал в условиях повышенных нагрузок. Другой пример – дамасская сталь. Ее делали в средние века в Сирии, потом секрет был утерян, но некоторое количество изделий сохранилось. Недавно специалисты Массачусетского технологического института (MIT) в США раскрыли секрет дамасского чуда. Выяснилось, что древесный уголь в Сирию привозили из Индии, а в стали углерод присутствует в виде нанотрубок. Как это получилось – непонятно, но именно эти трубочки делали сталь очень прочной и гибкой. Теперь подобный материал создают в петербургском институте «Прометей» [9]. На рис. 1 приведена классификация наноматериалов, а в табл. 1 из [9] сведены данные анализа результатов отечественных и зарубежных исследований, свидетельствующих о высокой перспективности следующих основных направлений в области разработки конструкционных материалов:

- изготовление наноструктурных керамических и композиционных изделий точной формы;

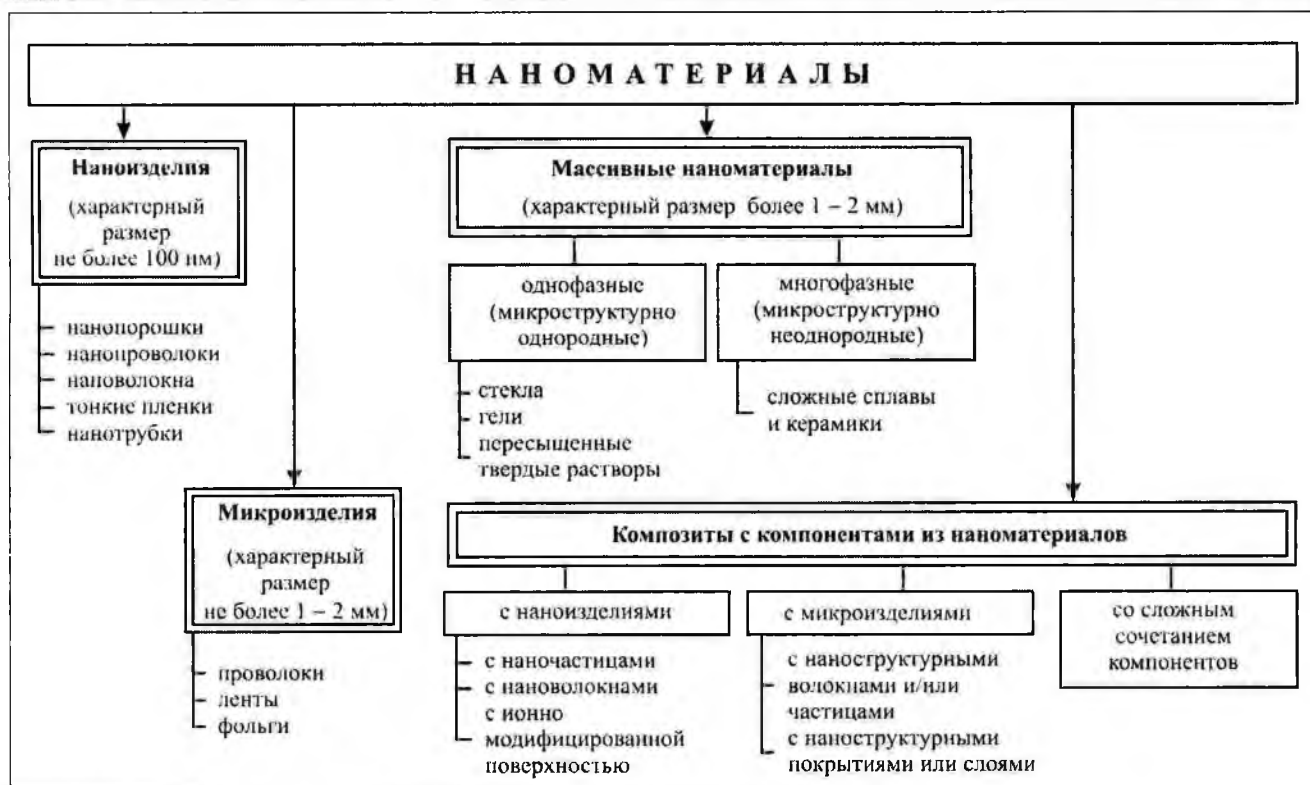


Рис. 1. Классификация наноматериалов [9]

Таблица 1. Приоритетные направления развития наноматериалов за рубежом

США	Япония	Страны ЕС (Германия, Великобритания, Италия, Швеция, Швейцария)
Нанокатализаторы Тонкая конструкционная керамика Высокопрочные стали Магнитные наноматериалы Материалы с особыми электрофизическими свойствами (сверхпроводники, резистивные, сенсоры) Наноструктурированные покрытия Углеродные наноматериалы	Тонкая конструкционная керамика Нанокompозиты Углеродные наноматериалы Магнитные наноматериалы	Нанокатализаторы Полимерные и металлополимерные нанокompозиты Жаропрочные сплавы Сплавы сверхбыстрого затвердевания

- создание наноструктурных твердых сплавов для производства режущих инструментов с повышенной износостойкостью и ударной вязкостью;

- создание наноструктурных защитных термо- и коррозионностойких покрытий;

- создание обладающих повышенной прочностью и низкой воспламеняемостью полимерных композитов с наполнителями из наночастиц и нанотрубок.

Большое внимание уделяется созданию композиционных наноматериалов со специальными механическими свойствами:

- теплозащитные и износостойкие наноструктурные покрытия;

- композиционные наноматериалы с высокими антифрикционными свойствами;

- композиционные наноматериалы с высокой стойкостью к экстремальным воздействиям для термически и радиационностойких конструкций;

- наноструктурированные катализаторы для очистки промышленных газовых выбросов.

В последние годы разработаны нанокompозитные металлокерамические материалы, в частности, на основе карбидов вольфрама и титана WC-Co и TiC-Fe, значительно превосходящие по износостойкости, прочности и ударной вязкости аналоги с обычной микроструктурой. Повышенные эксплуатационные характеристики нанокompозитных материалов обусловлены образованием при спекании специфических непрерывных нитевидных структур, формирующихся в результате трехмерных контактов между наночастицами раз-

ных фаз. Разработка и внедрение в промышленное производство технологии создания нанокomпозитных изделий будет способствовать решению проблемы изготовления высококачественных режущих инструментов.

Повышение коррозионной стойкости наноструктурных покрытий обусловлено, в первую очередь, снижением удельной концентрации примесей на поверхности зерен по мере уменьшения их размеров. Наноструктурные покрытия характеризуются сверхвысокой прочностью. Один из основных механизмов упрочнения обусловлен эффектом скопления дислокаций вблизи препятствий, которыми при уменьшении размеров зерен являются их границы.

Использование диспергированных в полимерной матрице неорганических наполнителей из наноразмерных порошков позволяет существенно повысить огнестойкость пластмасс, являющуюся одним из основных недостатков при использовании их в качестве конструкционных материалов, поскольку продукты сгорания полимеров – это, как правило, ядовитые вещества. Результаты исследований показывают, что снижение горючести может быть доведено до самозатухания пламени. При этом наноразмерные порошковые наполнители не снижают механической прочности и обрабатываемости материалов. Полимерные нанокomпозиты обладают высокой абляционной стойкостью, что открывает перспективы их использования для защиты поверхности изделий, эксплуатируемых в условиях воздействия высоких температур.

В качестве примеров использования современных наноматериалов в [9] приведены следующие.

**Импульсные магнитные системы.** Создание таких систем со сверхсильным магнитным полем (с индукцией более 50 Тл) потребовало разработки нового класса обмоточных материалов с уникальным сочетанием высоких прочностных и электропроводящих свойств. Во ВНИИМ разработаны технологии получения методом глубокой пластической деформации (обеспечивающей измельчение зерен металла до наномасштаба) нового класса высокопрочных медно-ниобиевых (Si-Nb) обмоточных проводов с пределом прочности 1100–1250 МПа и электропроводностью около 70 % от меди, т.е. полученный нанокomпозит имеет прочность стали при электропроводности, близкой к меди.

На рис. 2 показано место новых наноструктурных электропроводящих композитов по отно-

шению к другим известным проводящим материалам. Нанокomпозиционные проводники на основе ниобия и меди обладают повышенной прочностью и электропроводностью. Разработаны также высокопрочные Si-Nb тонкие провода диаметром от 0,4 до 0,05 мм с рекордными свойствами: предел прочности 1300–1600 МПа, электропроводность 70–80 % от меди.

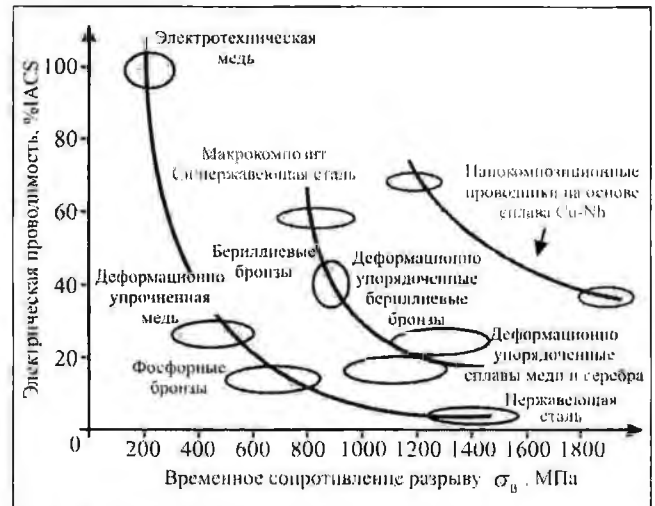


Рис. 2. Сравнение характеристик различных проводников тока [9]

**Углеродные наноматериалы.** К числу наиболее перспективных и широко исследуемых наноматериалов, обладающих широким спектром применений, относят так называемые фуллерены и углеродные нанотрубки (carbon nano-tube, CNT) – молекулярные соединения, принадлежащие модификациям углерода. Углеродную нанотрубку можно представить как лист графита, свернутый в цилиндр. Однослойная нанотрубка может иметь диаметр 2 нм и длину до 100 мкм и более. Углеродные нанотрубки вместе с фуллеренами и мезопористыми углеродными структурами образуют новый класс углеродных наноматериалов, или углеродных каркасных структур, со свойствами, которые значительно отличаются от свойств других форм углерода таких, как графит и алмаз.

Промышленное внедрение углеродных нанотрубок ведется в области хранения электрической энергии (водородные топливные ячейки), конденсаторов высокой емкости, устройств с хорошей электронной эмиссией (дисплеи, электронная микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия и др.), а также в качестве наполнителей для антифрикционных прокладок, работающих в авиационных и автомобильных двигателях.



Ведется разработка материалов и покрытий на основе нанотрубок для снижения трения в микроэлектромеханических устройствах и нанозлектромеханических устройствах. В настоящее время главными областями применения углеродных нанотрубок являются спортивные товары, электроника и автомобилестроение. Углеродные нанотехнологии могут использоваться в радиоэлектронике для поглощения микроволнового излучения, создания новых материалов с управляемыми электромагнитными и даже сверхпроводящими свойствами. Нанотрубки могут стать элементом компактных интегральных схем.

Перспективным направлением представляется использование углеродной нанопены – вспененных полимеров, содержащих углеродные нанотрубки. Эти материалы также можно получать зольгель-технологиями в виде покрытий с низкой плотностью и хорошими теплоизолирующими свойствами. Промышленное внедрение нанопористого углерода ведется в различных мембранных фильтрующих материалах и для электрических батарей большой емкости. Покрытия на основе различных углеродных материалов и наноструктурированных композитных тонких пленок уже нашли широкое применение в промышленности.

Большой интерес вызывает использование еще одного наноматериала из углерода – фуллерена (рис.3).

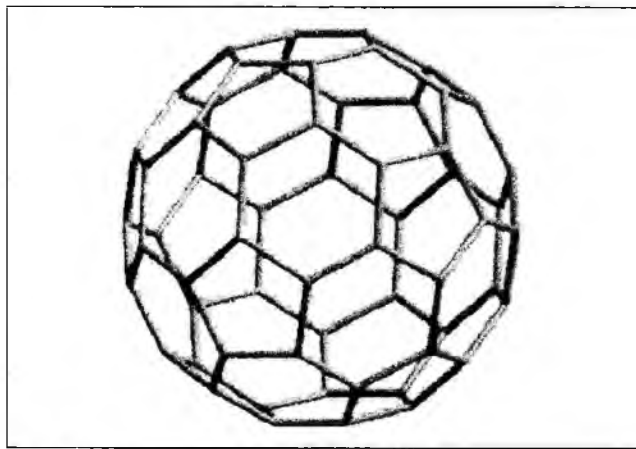


Рис. 3. Молекула фуллерена  $C_{60}$  [9]

Фуллерены представляют собой химически стабильную замкнутую поверхностную структуру углерода, в которой атомы углерода расположены в вершинах правильных шести- или пятиугольников, регулярным образом покрывающих поверхность сферы или сфероида. Число атомов углерода в молекуле фуллерена больше или равно 60. Химики

разделяют фуллерены на две группы: легкие фуллерены, к которым относят  $C_{60}$  и  $C_{70}$ , и тяжелые (высшие) фуллерены, к которым относят остальные фуллерены, число атомов в которых более 70.

Уникальная структура фуллеренов обуславливает их уникальные физические и химические свойства. В соединении с другими веществами они позволяют получить материалы с принципиально новыми свойствами. Промышленное внедрение фуллеренов рассматривается в качестве наполнителей в различных объемных нанокompозитах, либо в качестве антифрикционных материалов или добавок в различные смазки для защиты от износа и коррозии. В Технологическом институте сверхтвердых и новых углеродных материалов (г. Троицк, Московская обл.) впервые в мире созданы принципиально новые углеродные материалы на основе фуллеренов с твердостью и объемным модулем упругости выше, чем у алмаза (ультратвердый фуллерит, полученный из фуллеренов  $C_{60}$ ). Разработана экспериментальная технология их синтеза, исследованы структура и основные физические свойства, получено четыре патента РФ и патент США. Ведутся работы по созданию промышленных технологий производства этих новых материалов и исследуются их возможные применения. Там же синтезируются и исследуются материалы на основе углеродных нанотрубок. Созданы углерод-азотные наноматериалы (нанофибры), имеющие рекордную эмиссионную способность и стабильность не менее 100 ч (прототипы источников света и дисплеев).

Широкое применение получают нанопорошки углерода, которые используются в ряде стран в массовом производстве в качестве добавок в резину для улучшения механических свойств (уменьшения износа, увеличения твердости, улучшения вязкости).

**Многофункциональные нанокompозиты.** Это материалы, состоящие из наночастиц, нановолокон или наноткани, распределенных в ненокристаллитной матрице, а также в виде нанокристаллитов одного материала, распределенных в аморфной матрице другого материала. Таковыми являются: полимерные нанокompозиты (наночастицы и нанотрубки в полимерной матрице, резина с наночастицами, полиэффины со слоистыми наноструктурами, кремнеорганические нанокompозиты, тканые наноматериалы и нанонити в полимерной матрице); керамические нанокompозиты (керамическая матрица с наполнителем из нанокристаллитов углерода или других наночастиц, керамическая матрица с нанополимерами).



**Наноструктурированные металлы и сплавы.**

К ним относятся наноструктурированное железо и цветные металлы, а также металлические нанопорошки и металлы, получаемые методами порошковой металлургии.

**Полимерные нанокомпозиты.** К ним относятся полимеры или сополимеры, в составе которых есть отдельные наночастицы или нановолокна толщиной от 1 до 50 нм. Считается, что нанополимеры и полимерные нанокомпозиты являются перспективными материалами для использования в медицине, энергетике, а также в качестве конструкционных материалов.

**Керамические нанокомпозиты.** К ним относятся оксидную и неоксидную керамику, силикаты, твердые сплавы (карбиты, бориды) на металлической связке, получаемые порошковыми методами, а также керамику макс-фаз. По сравнению с существующими сейчас керамическими материалами нанокерамика обладает улучшенными характеристиками: высокой прочностью и твердостью, меньшей плотностью, уменьшенным модулем упругости, повышенным электрическим сопротивлением, повышенной температурной стойкостью, пониженной теплопроводностью.

**Нанопорошки.** Получаются при тонком измельчении материалов. Когда размеры частиц измельченного вещества попадают в нанобласть, наблюдаются коренные изменения физико-химических свойств (аморфизация, химическая активность, повышенная растворимость, растворимость нерастворимых веществ и т.д.).

**Нанoeлектроника и нанofотоника**

В [9] предложены основные направления применения наноматериалов на основе позиций, формирующихся новым технологическим укладом. Динамика развития и распространения нанотехнологий в электронной промышленности наглядно иллюстрирует логику формирования технологической траектории ядра нового технологического уклада в следующих направлениях.

**Светодиоды.** Типичным примером быстрого повышения эффективности энергопотребления по мере роста нового технологического уклада является распространение светодиодов в светотехнике. Светодиод – полупроводник, работа которого основана на физическом явлении возникновения светового излучения при прохождении электрического тока через  $p-n$ -переход полупроводника. Полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) – это исторически первые гетероструктур-

ные приборы, широко используемые на практике [15]. СИД стали очень привычными из-за их широкого использования в качестве миниатюрных индикаторов в аудио- и видеоаппаратуре и бытовой технике. Кроме высокой световой отдачи, малого энергопотребления и возможности получения любого цвета излучения, светодиоды обладают рядом других замечательных свойств. Отсутствие нити накала благодаря нетепловой природе излучения светодиодов обуславливает фантастический срок службы. Производители светодиодов декларируют срок службы до 100 тыс. ч, или 11 лет непрерывной работы. Отсутствие стеклянной колбы определяет очень высокую механическую прочность и надежность. Малое тепловыделение и низкое питающее напряжение гарантируют высокий уровень безопасности, а безынерционность делает светодиоды незаменимыми, когда нужно высокое быстродействие.

**Нанoeлектромеханические MEMS-системы.**

Наиболее быстро растущей частью полупроводниковой отрасли становится рынок микроэлектромеханических систем (MEMS – от Micro Electro Mechanical Systems). MEMS получают путем комбинирования механических элементов, датчиков и электроники на общем кремниевом основании посредством технологий микропроизводства. Все элементы могут быть реализованы в виде единого изделия, причем сразу десятками или сотнями, как микросхемы на кремниевой пластине. В основе этого лежит апробированная традиционная технология производства полупроводниковых интегральных микросхем. Новые возможности для MEMS-систем открывают нанотехнологии.

Движимый MEMS-технологиями сектор оптоэлектроники, сенсоров и дискретных компонентов по темпам роста заметно опережает сектор интегральных схем. Развиваются MEMS-устройства оптических коммутаторов для оптоволоконных телекоммуникационных систем. MEMS-технология в настоящее время – самая передовая и перспективная технология производства СВЧ-устройств [9].

**СВЧ-электроника.** Аналогичным образом развитие промышленности средств связи привело к прогрессу в СВЧ-электронике на основе использования наноразмерных гетероструктур, обеспечивающих создание самых высокоскоростных трехэлектродных твердотельных приборов, и доминирующих в системах связи, радиолокации, СВЧ-радиометрии, навигации, в устройствах для борьбы с терроризмом, а также современных электронных средств вооружений (бортовых и назем-

ных радиолокаторов, средств радиоэлектронной борьбы и т.д.). Достижение минимального размера элемента (длины затвора транзистора) значения 30 – 50 нм обеспечило качественный скачок – создание СВЧ-приборов с диапазоном частот свыше 1000 ГГц, которое можно считать рубежом перехода к шестому технологическому укладу.

Переход в СВЧ-нанoeлектронике от субмикронных транзисторов (MESFET-транзисторов), (MESFET – от metalized semiconductor fieldeffect transistor – полевой транзистор с затвором Шоттки) к гетероструктурным нанотранзисторам (HEMT-нанотранзисторам) ознаменовал не простое «механическое» масштабирование транзисторных характеристик, а качественный переход от классического электронного газа к квантовому двумерному электронному газу, и от квазиравновесного электронного транспорта к бесстолкновительному баллистическому транспорту [9]. В СВЧ-устройствах это обеспечило многократное увеличение быстродействия, переход от сантиметрового диапазона длин волн к миллиметровому и субмиллиметровым диапазонам и соответственно увеличение скоростей и объемов передаваемой информации в системах связи и радиолокации, разрешающей способности в радиолокации.

Последние достижения СВЧ-нанoeлектроники в мире включают: гетероэпитаксию наноструктур с толщинами слоев до 15 нм, нанолитографию формирования затворов транзисторов с базой менее 100 нм и другие операции изготовления нанотранзисторов; транзисторы на наногетеросистеме с квантовыми ямами с использованием полупроводников на основе соединений индия, алюминия, галлия, фосфора, мышьяка ( $\text{InAlAs/InGaAs/InAlAs/InP}$ ) с предельной частотой усиления по мощности 190 ГГц, транзисторы на наногетеросистеме с квантовыми ямами  $\text{AlGaAs/InGaAs/AlGaAs/GaAs}$  с рекордно низким коэффициентом шума 0,37 дБ на частоте 12 ГГц, транзисторы на широкозонной гетеросистеме  $\text{AlGaN/GaN}$  с рекордно высокой частотой усиления 107 ГГц, ряд других типов транзисторов, а также результаты разработок СВЧ-монокристаллических (объемных) интегральных схем на нанотранзисторах.

Сейчас в гетероструктурной СВЧ-технологии наиболее перспективными считаются два направления.

1. Широкозонные гетеросистемы на основе нитрида галлия GaN и твердых растворов  $\text{AlGaN}$ . У нитрида галлия ширина запрещенной зоны 3,4 эВ, т.е. в 2,5 раза больше, чем у GaAs, по-

этому максимальная выходная мощность приборов на нитридах на порядок выше, чем в транзисторах на GaAs. Именно с этим направлением связывают грядущую революцию в «твердотельной» радиолокации на активных фазированных антенных решетках (АФАР). К сожалению, гражданский сегмент рынка для отечественной СВЧ-гетероэлектроники пока отсутствует.

2. Это направление базируется на изоморфной и псевдоморфной гетеросистемах  $\text{InAlAs/InGaAs}$ , выращиваемых на подложках InP. Транзисторы на таких гетероструктурах – самые высокоскоростные из всех существующих в мире твердотельных трехэлектродных приборов. Их рабочие частоты уже перешагнули за 100 – 200 ГГц и приближаются к субмиллиметровому диапазону. На гетеросистеме  $\text{InAlAs/InGaAs}$  с использованием 50-нм технологии за рубежом сейчас разрабатываются самые высокоскоростные оптоволоконные линии связи – до 100 Гбайт/с и выше.

**Лазерная техника.** Базовым изобретением в этой области, определяющим переход к шестому технологическому укладу, следует считать создание высокоэффективных лазеров, использующих гетероструктуры с наноразмерными слоями – с квантовыми ямами и квантовыми точками (рис. 4 и 5). В России основные исследования в этом направлении ведутся в Физико-техническом институте (ФТИ) им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), а также в Институте физики полупроводников (г. Новосибирск). Использование нанотехнологий позволяет качественно улучшить и поднять эффективность изготовления полупроводниковых лазеров, светодиодов и осветительных систем на их основе.

Полупроводниковые лазерные диоды относятся к числу наиболее сложных гетероструктурных приборов. Области применения полупроводниковых лазеров весьма разнообразны: оптические устройства записи, хранения и считывания данных, системы волоконно-оптической связи, системы накачки твердотельных лазеров, датчики различного типа, медицина и т.д. Например, использование электромагнитного излучения терагерцевого диапазона безвредно для человека. Поэтому при создании соответствующих систем управления терагерцевым излучением и регистрации изображений можно строить эффективные системы интродукции (интроскопии) взамен рентгеновских, а также системы локализации и др.

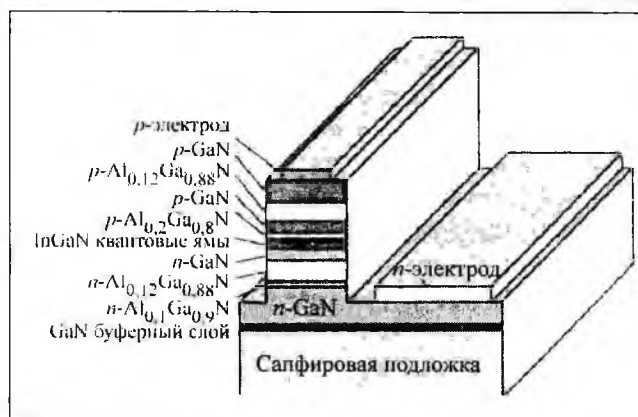


Рис. 4. Структура эпитаксиальных слоев инжекционного лазера на квантовых ямах [9]

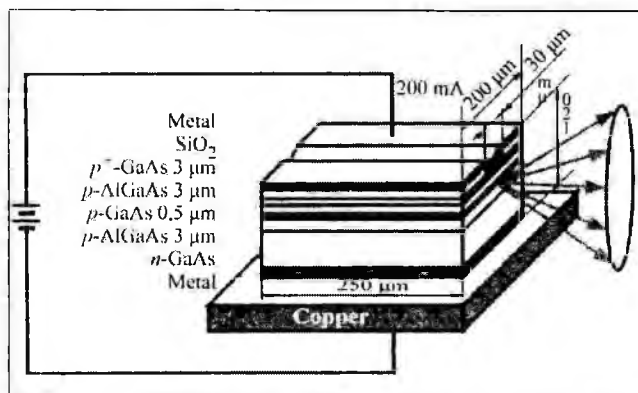


Рис. 5. Схематическое изображение структуры первого инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре [9]

Применение наночастиц и полупроводниковых нанопроводов позволило создать сверхкоротковолновые лазеры (нанолазеры), обещающие увеличение плотности оптических дисков в десятки раз. Коротковолновый лазер с длиной волны 5 – 50 нм может найти свое применение в новых видах оптической микроскопии и литографии высокого разрешения, необходимой для создания микро- и наноэлектроники нового поколения. Кроме того, этот диапазон ультрафиолетового света очень перспективен в спектроскопических методах анализа вещества. Устройства хранения данных (информации) ждет большое будущее. При смене красных лазеров, используемых сегодня для записи CD-систем, на нанолазеры плотность записи возрастет более чем в 1000 раз.

**Молекулярная электроника.** Как реальная альтернатива «кремниевой» электронике в недалеком будущем многими специалистами рассматривается молекулярная электроника. Тому есть несколько причин. Природа создала за миллионы лет

эволюции самые разнообразные молекулы, выполняющие все необходимые для сложного организма функции: сенсорные, логически-аналитические, запоминающие, двигательные. Они открывает дорогу к созданию сложных микросхем, размером в несколько молекул, совершенствование которых в дальнейшем позволит получить еще меньшие, более быстрые и дешевые устройства.

Пределом уменьшения размеров и энергопотребления, а также увеличения быстродействия в информационных системах, основанных на двоичной логике, является использование в качестве элементарной ячейки отдельных молекул, имеющих два стабильных состояния. Большинство работ по созданию новой нанотехнологической элементной базы информатики и электроники посвящено поиску и разработке элементов с двумя устойчивыми состояниями на основе молекул, нанокластеров или наночастиц. Основной проблемой является интеграция таких элементов, создание межэлементных связей, управление информационными потоками в таких системах.

Перспективным направлением развития электроники, определяющим прогресс информационных и телекоммуникационных технологий в ближайшие 10 – 20 лет, является переход от двоичной логики к нейросетевым методам обработки информации в непрерывных распределенных молекулярных и биомолекулярных средах с использованием в качестве носителей информации световых потоков [9]. Оптические методы обработки информации на порядки производительнее методов, основанных на транспорте электронов, кроме того, они упрощают решение проблем параллельной обработки информации и создание трехмерных функциональных структур. Функциональные возможности молекулярной фотоники позволяют реализовать значительно более высокую степень интеграции и быстродействие, недостижимые в традиционной микроэлектронике, создать новые архитектуры высокопроизводительных систем для обработки сверхбольших массивов информации, а также устройства хранения информации большой емкости. Разрабатываемые функциональные материалы позволят формировать нейросетевые интеллектуальные самообучающиеся системы адаптивного управления динамическими объектами.

Объединение достижений нано- и биомолекулярных технологий позволяет получить принципиально новые материалы для специализированной



элементной базы нейрокомпьютеров и интеллектуальных робототехнических систем, способных к автономному обучению и успешной последующей работе в сложных условиях внешней среды.

Другой областью применения молекулярных систем на основе органических и неорганических соединений является разработка эффективных дешевых светодиодов во всем видимом спектре излучения, в том числе белого света, и создание на их основе сверхтонких гибких дисплеев и других устройств отображения информации, а также экономичных дешевых источников освещения для замены ламп накаливания.

В настоящее время существующих фундаментальных знаний и нанотехнологий достаточно лишь для демонстрации принципиальных возможностей создания практически всех структур, необходимых для информационных технологий и микроробототехники. В ближайшем будущем они будут играть важную роль во многих приложениях. Молекулярная электроника входит составной частью в более крупную отрасль – нанобиотехнологию, занимающуюся биообъектами и биопроцессами на молекулярном и клеточном уровне и держащую ключи к решению многих проблем экологии, медицины, здравоохранения, сельского хозяйства, национальной обороны и безопасности.

**Квантовые компьютеры.** В начале XXI в. размеры схемных элементов компьютеров вошли в нанообласть (достигли 100 нм), а к 2020 г. они должны достичь нескольких атомов. Это будет означать качественное изменение поведения этих элементов – они будут представлять собой чисто квантовые объекты, описание которых дается квантовой механикой. С появлением квантовых компьютеров создан новый тип компьютерной памяти, строящийся не на базе традиционной логики, а использующий ассоциативную, распределенную по всей структуре память, подобно нейронным сетям живых организмов. Такая система будет способна распознавать образы, принимать оперативные решения в многофакторных ситуациях (например, в экономике, оборонных задачах, космических исследованиях) в реальном времени без механического перебора всех возможных вариантов.

**Спинтроника.** Твердотельная электроника второй половины XX в. была основана на переносе заряда электронов и управлении им с помощью электрических и магнитных полей. В конце века возникло и стало быстро развиваться новое на-

правление, активно использующее то обстоятельство, что электрон, помимо заряда, обладает сугубо квантово-механической характеристикой – собственным угловым моментом (спином) и связанным с ним магнитным моментом. Это новое научное и технологическое направление получило название «спиновая электроника», или «спинтроника». Спинтроника – устоявшийся термин, относящийся к области квантовой электроники. Существуют разные его толкования: электроника переноса спина (spin transport electronics); электроника, основанная на спине (spin-based electronics), или просто спинэлектроника (spin-electronics) [10].

В спинтронике изучаются и эксплуатируются магнитные потоки, сильно напоминающие по своим свойствам электрические. Однако такие потоки в отличие от электрических не выделяют тепло [11 – 13]. Интерес исследователей к спиновой электронике возник в связи с открытием в 1988 г. гигантского магниторезистивного эффекта (GMR-эффект), или гигантского магнитосопротивления (ГМС), положившим начало спинтронике. Открытие ГМС позволило создать высокоточные сенсоры магнитного поля, датчики углового вращения и, что самое главное, считывающие головки жестких дисков. Первые считывающие ГМС-головки были выпущены в 1997 г. компанией IBM, и в настоящее время используются практически во всех жестких дисках.

Компания Motorola начала массовое производство спинтронных модулей памяти MRAM (Magnetoresistance Random Access Memory – магниторезистивная память с произвольной выборкой). Главное отличие таких модулей – записанная информация не пропадает при отключении питания, так как электроны способны сохранять положение спина сколь угодно долго. MRAM уже нашла применение в сотовых телефонах, мобильных компьютерах, идентификационных картах. Кроме того, новую память используют военные для управления боевыми ракетами и для контроля за космическими станциями.

Спинтроника даст возможность также создать СВЧ-генераторы и другие микроволновые приборы нового поколения.

Специалисты выделяют три главных направления развития спинтроники в ближайшие десятилетия: квантовый компьютер, спиновый полевой транзистор и спиновая память. В данной области используются качественно новые гетероструктуры – нанопленки.

## 2. Особенности развития углеродных нанотрубок как структуры новых материалов в радиофизике

### Углеродные нанотрубные структуры – материал для эмиссионной электроники

В [3] со ссылкой на отечественные и зарубежные материалы [16 – 30] приведены результаты исследований эмиссионных характеристик углеродных слоев, состоящих из нанотрубок (НТ). Получена автоэлектронная эмиссия с плотностью тока  $10 \text{ mA/cm}^2$  при средней напряженности электрического поля  $1,5 - 2,2 \text{ В/мкм}$ . Предполагается, что данные структуры могут быть использованы в плоских вакуумных дисплеях и вакуумных СВЧ-приборах. Такие структуры позволяют создать, например, эффективные протяженные источники электронной эмиссии в вакуумпланарных автоэлектронных эмиттерах и эмиттерных решетках, а также принципиально новых типов электровакуумных электронных приборов СВЧ- и вакуумных интегральных схем (БИС).

В [3] достаточно полно описан новый эмиссионный материал, приближающийся к тому, чтобы удовлетворять необходимым электрофизическим и технологическим требованиям. Это тонкие слои, состоящие из *углеродных нанотрубок*.

Остановимся на основных результатах и выводах, полученных в указанной работе, посвященной важным и актуальным вопросам в области исследований углеродных нанотрубных структур в качестве нового материала для эмиссионной электроники.

**Углеродные слои из нанотрубок.** В краткой хронологической справке получения углеродных слоев из нанотрубок в [3] отмечается следующее.

Одним из наиболее популярных направлений исследований в физике и химии твердого тела к началу 90-х годов было изучение новой аллотропной фазы углерода гипермолекулы  $C_{60}$ , названной *фуллереном*.

Позднее были обнаружены и исследованы другие стабильные гипермолекулы углерода такого типа –  $C_{70}$ ,  $C_{76}$ ,  $CS_4$ ,  $C_{96}$  и др. Все они имеют сферическую форму и состоят из шести- и пятиугольных ячеек. Возможности иной формы фуллеренов рассмотрены в [17, 18], где показано, что под действием внешних сил сферическая гипермолекула  $C_{60}$  может приобрести бочкообразную форму, названную «барреленом». Позднее рассматривались и другие стабильные состояния

углеродных гипермолекул, в частности, гипермолекула в виде нанотрубки, закрытой на концах «шапочками» из половинок молекулы  $C_{60}$ . Таким образом, диаметр трубки равнялся диаметру сферы  $C_{60}$ . Этот вариант углеродных гипермолекул был назван «тубеленами». Такая структура представляла собой пленку толщиной  $0,1 \text{ мкм}$ , состоящую из однослойных нанотрубок диаметром  $1 \text{ нм}$  и длиной (на всю толщину пленки) порядка  $100 \text{ нм}$ . Для получения пленок использовался метод электронно-лучевого испарения высокоочищенного ( $99,99 \%$ ) графита в вакууме  $10^{-5}$  Торр на подложку при комнатной температуре. Подложками служили полированные кремний, кварц, анодированный алюминий, графит и керамика. Толщина пленок варьировалась от  $0,01$  до  $10 \text{ мкм}$ . Процесс роста нанотрубок и нанотрубных пленок заключался в следующем.

Вблизи поверхности подложки формировалась паровая фаза из потока частиц углерода, создаваемого путем распыления графита электронным лучом, и частиц углерода, отраженных от поверхности подложки. При достижении давления приблизительно  $100 \text{ Торр}$  происходит конденсация паровой фазы в форме наиболее устойчивой в этих условиях кластерной структуры  $C_{2n}$  – фуллеренов или, при недостаточной концентрации центров конденсации, в виде графитизированных фуллеренов – лукович. Диаметр фуллеренов  $C_{2n}$  зависит от плотности паровой фазы углерода и разности температур горячих и холодных частиц углерода, а  $r$  – степень графитизации фуллеренов (число слоев) – от плотности паровой фазы углерода и концентрации центров конденсации. Полученные в паровой фазе кластеры осаждаются на подложке, образуя монослой из фуллеренов. После образования сплошной фуллереновой пленки на поверхности подложки заканчивался процесс образования фуллеренов и начинался процесс роста нанотрубок (НТ) в направлении потока углеродных частиц. Рост НТ из фуллеренов осуществлялся путем достраивания пентагонов на поверхности полусферы фуллерена, близлежащей к потоку углерода, до гексагонов с образованием колец гексагонов и образования новых пентагонов, необходимых для образования полусферы фуллерена. Таким образом, в направлении потока углеродных частиц происходит рост пленки из ориентированных однослойных или многослойных нанотрубок. Объединенные в зерна фуллерены в результате роста образуют жгуты нанотрубок диаметром  $20 - 50 \text{ нм}$ . Изменяя на-

правление потока, можно выращивать нанотрубки под углом от 0 до 45° к нормали поверхности подложки. Эти пионерские результаты получены в основном отечественными учеными.

Все последующие работы, связанные с изучением физики и технологии углеродных нанотрубок отмечаются в работах [3, 20 – 26].

#### Автоэлектронная эмиссия из углеродных слоев с нанотрубками

На изображениях, сделанных с помощью сканирующего туннельного микроскопа [28], видно, что поверхность углеродных слоев с нанотрубками, изготовленных методом электронно-лучевого распыления графита, представляет собой плоскость, усеянную остриями нанометрового диаметра, причем плотность упаковки этих острий может достигать  $10^{12} - 10^{14}$  шт. на  $1 \text{ см}^2$ . При приложении электрического поля эти острия могут стать источниками автоэлектронной эмиссии. Это позволило выдвинуть идею использования таких пленок в качестве эмиттеров электронов в вакууме [29]. Первые результаты исследований были опубликованы в начале 1994 г. и представлены на 7-й Международной конференции по вакуумной микроэлектронике в июле 1994 г. в Гренобле. На данных пленках была получена автоэлектронная эмиссия с плотностью тока до  $0,1 \text{ А/см}^2$  при средней напряженности электрического поля  $30 \text{ В/мкм}$  [30].

Особенностью углеродных слоев с нанотрубками, изготовленных методом электроннолучевого испарения графита в вакууме, являлось плотное расположение нанотрубок в слое. В результате этого при наложении внешнего напряжения локальное электрическое поле вблизи кончиков нанотрубок оказывается относительно низким вследствие эффекта взаимной экранировки электрического поля соседними нанотрубками. Поэтому автоэлектронная эмиссия из таких слоев наблюдалась при относительно высокой средней напряженности электрического поля  $10 - 30 \text{ В/мкм}$ .

На рис.6 представлена микрофотография углеродного слоя с НТ, выращенного методом химического осаждения из газовой фазы, сделанная в растровом электронном микроскопе. Слой представляет собой неориентированные перепутанные НТ. Длина некоторых НТ достигает 10 и более микрон. Среднее эффективное расстояние между ними менее 1 мкм.

Микрофотография конца одной углеродной НТ, выращенной методом химического осаждения

из газовой фазы (просвечивающая электронная микроскопия), представлена на рис. 7. Нанотрубка имеет внешний диаметр около 30 нм.

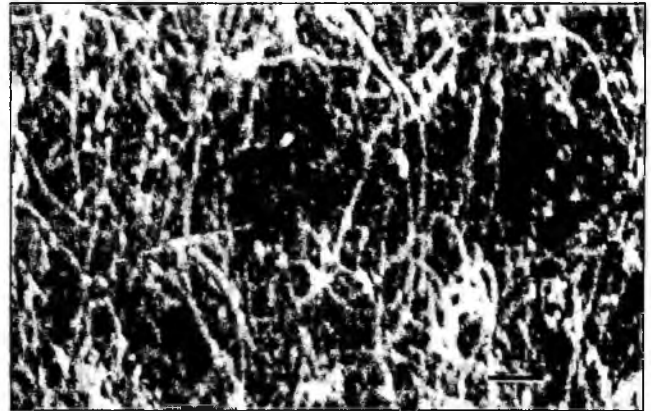


Рис. 6. Микрофотография углеродного слоя с нанотрубками [30]

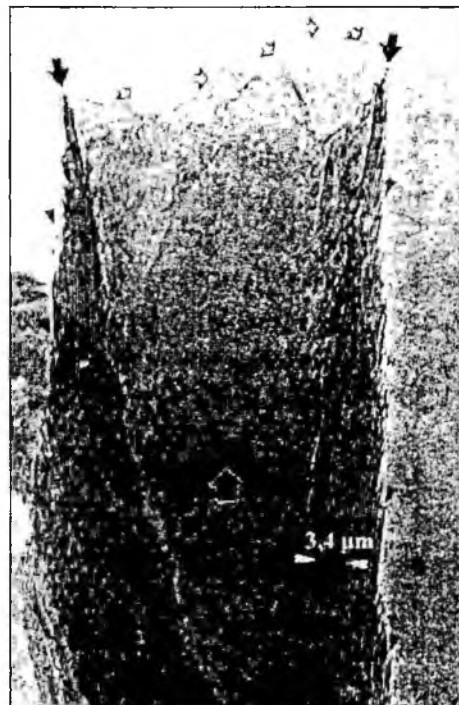


Рис. 7. Микрофотография конца одной углеродной нанотрубки, выращенной методом химического осаждения из газовой фазы [30]

На рис. 7 видны отдельные графеновые слои, лежащие под углом около 20° к оси НТ. Как видно из рисунка, при приближении к открытому концу трубки толщина стенки уменьшается и доходит до 1 – 2 графеновых слоев (менее 1 нм). Такие острые края НТ очень сильно концентрируют электрическое поле и, по-видимому, являются местом, откуда происходит автоэмиссия. Причина возникновения такой полости вблизи конца НТ ясна не полностью, но вероятно в ней находилась никелевая



каталитическая частица, которая выпала из нанотрубки при окончании процесса роста.

Исследования автоэлектронной эмиссии проводились в сверхвысоком вакууме. Анод представлял собой цилиндр из нержавеющей стали оканчивающийся полусферой диаметром 2 мм.

С помощью вакуумного манипулятора анод подводился к поверхности эмиттера на расстояние 100 – 500 мкм. В такой системе площадь рабочей эмиттирующей поверхности эмиттера составляла около  $10^{-3}$  см<sup>2</sup>. С помощью манипулятора можно было сканировать всю поверхность эмиттера. В качестве примера на рис. 8 приведены типичные вольт-амперные характеристики автоэмиссии, измеренные на углеродных структурах с нанотрубками, выращенных на Ni-фольге методом химического осаждения из газовой фазы. При этом, поскольку локальное электрическое поле  $E_{loc}$  вблизи конца нанотрубок было неизвестно, исследовалась зависимость эмиссионного тока от среднего электрического поля  $E_{av}$ , где  $E_{av} = V/d$ ;  $d$  – расстояние между эмиттером и анодом. По данным рис. 8 сделано заключение, что эмиссионный ток на уровне  $10^{-11}$  А появляется при средней напряженности электрического поля  $E_{av} = 0,7 \dots 1,1$  В/мкм. Значение тока 10 мкА (плотность тока  $j \approx 10$  мА /см<sup>2</sup>) достигается при  $E_{av} = 1,5 \dots 2,2$  В/мкм.

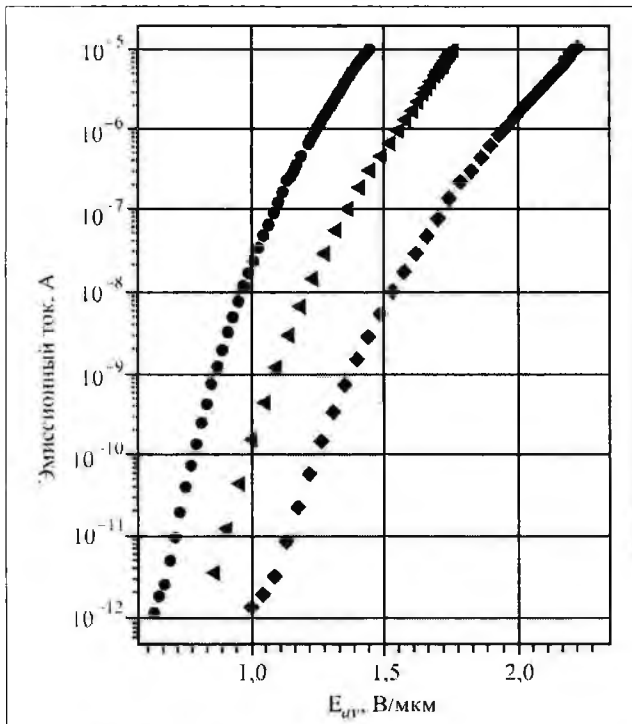


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики автоэмиссии, измеренные на углеродных структурах с нанотрубками, выращенными на Ni-фольге методом химического осаждения из газовой фазы

Эмиссионные характеристики углеродных структур с нанотрубками анализировались на основе теории Фаулера – Нордгейма. Для оценки плотности эмиссионного тока использовалось выражение вида

$$j \approx \frac{1,56 \cdot 10^{-6} (\beta E_{av})^2}{\varphi} \exp\left(-\frac{6,83 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{\beta E_{av}}\right), \quad (1)$$

где  $j$  – плотность эмиссионного тока, А/см<sup>2</sup>;  $E_{av}$  – выражено в В/см;  $\varphi$  – работа выхода, эВ;  $\beta$  – коэффициент усиления электрического поля ( $\beta = E_{loc} / E_{av}$ ).

В координатах Фаулера – Нордгейма ( $\log j/E^2, 1/E_{av}$ ) вольт-амперные характеристики автоэмиссии представляются прямой линией.

Полученные путем измерений эмиссионные характеристики на углеродных структурах с неориентированными нанотрубками, перестроенные в координатах Фаулера – Нордгейма ( $\log j/E^2, 1/E_{av}$ ), приведены на рис. 9.

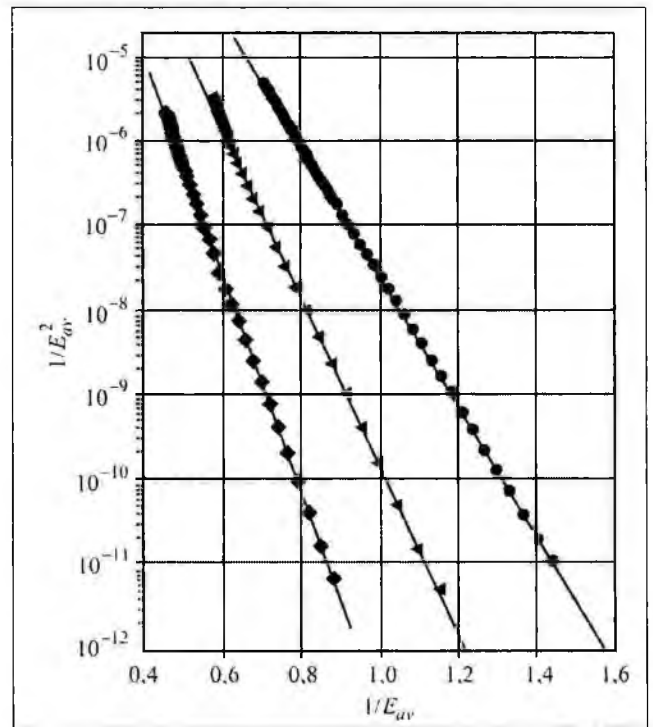


Рис. 9. Эмиссионные характеристики на углеродных структурах с неориентированными нанотрубками, перестроенные в координатах Фаулера – Нордгейма ( $\log j/E^2, 1/E_{av}$ ) [30]

Проведенные расчеты [30] показали, что величина  $\beta$  сильно зависит от расстояния между нанотрубками  $R$  и достигает максимальной величины при значении, большем или равном  $2H$ . Для использованных параметров нанотрубок ( $d = 20$  нм,

$H = 10$  мкм, концы нанотрубок закрыты полусферой) максимальная величина  $\beta = 500$ . Как видно из рисунка, характеристики являются прямолинейными в данных координатах при изменении тока на 5-6 порядков. Определив из графика наклон вольт-амперной характеристики и предположив, что  $\varphi = 4,7$  эВ (как у графита), можно определить коэффициент усиления поля  $\beta$ . Величина  $\beta = 2500 \dots 4000$ , что свидетельствует о сильной концентрации электрического поля вблизи кончика нанотрубки. Проводилось сравнение экспериментальных значений  $\beta$  с расчетом локального электрического поля и коэффициента усиления электрического поля  $\beta$  для модельной планарной структуры с множеством нанотрубок, расположенных на проводящей подложке перпендикулярно к ней [30]. В качестве исходных данных для расчета принималось: диаметр нанотрубок  $d$  соответствует минимальному диаметру нанотрубок, полученному при эксперименте в данной работе ( $d = 20$  нм), высота нанотрубок  $H = 10$  мкм, а расстояние между нанотрубками  $R$  варьируется в диапазоне от 0,01 до 200 мкм. В качестве модели, описывающей углеродные структуры с нанотрубками, было выбрано множество проводящих цилиндров диаметром  $d$ , расположенных на проводящей подложке в «сотом порядке». Сверху цилиндры заканчивались полусферой.

При сравнении результатов расчета с экспериментом учитывалось также, что исследованные углеродные слои с нанотрубками представляют собой слои с неориентированными углеродными нанотрубками со средним расстоянием между нанотрубками  $R < 1$  мкм. Для таких  $R$  коэффициент усиления  $\beta$  не превышает 50 [30]. В то же время на эксперименте для лучших образцов  $\beta$  достигает 4000, т.е. почти в 100 раз превышает расчетное значение.

Сильное расхождение между расчетом и экспериментом авторами объяснялось предположением, что в сильном электрическом поле морфология углеродного слоя и взаимное расположение НТ в нем существенно изменяются. А часть нанотрубок, которые не перепутались с другими в процессе роста, под действием пондеромоторных сил вытягиваются в направлении поля, перпендикулярном подложке. Сделано заключение, что в сильном поле расстояние между нанотрубками, определяющими автоэмиссию, и их высота могут превышать 10 мкм, что согласно модели приводит к  $\beta = 500$ . Дополнительным фактором, увеличи-

вающим  $\beta$ , является наличие острых кромок открытых концов нанотрубок, которые концентрируют электрическое поле гораздо сильнее, чем полусфера, использованная в модели.

Чтобы подтвердить сделанное предположение, авторы провели оценку пондеромоторных сил, действующих на концы НТ в сильном электрическом поле, соответствующем автоэмиссии. Для такой оценки использовалось выражение

$$F = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 S, \quad (2)$$

где  $F$  – сила, Н;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $E$  – электрическое поле, В/м;  $S$  – площадь конца нанотрубки.

С использованием параметров имеющихся НТ (диаметр нанотрубки  $d = 20$  нм,  $S = 3,14 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$ ) было получено, что при  $E = 3 \cdot 10^9$  В/м на кончик НТ действует сила  $F \approx 1 \cdot 10^{-8}$  Н. Эту величину сравнили с весом одной нанотрубки. При условии, что удельный вес НТ равен удельному весу графита, получено, что вес одной нанотрубки  $10^{-16}$  Н. Есть подтверждение тому, что пондеромоторная сила, действующая на кончик НТ, на 8 порядков превышает ее вес и, если жесткость нанотрубки не слишком велика, вытянет ее вдоль поля.

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать важные выводы:

- углеродные нанотрубки обладают уникальными эмиссионными характеристиками;
- на углеродных слоях с нанотрубками, изготовленных методом химического осаждения из газовой фазы, может быть получена плотность тока  $10 \text{ мА/см}^2$ , достаточная для работы в плоских вакуумных дисплеях, при средней напряженности электрического поля  $E_{av} = 1,5 \dots 2,2 \text{ В/мкм}$ ;
- термическая и химическая стабильности углерода, а также проведенные предварительные эксперименты позволяют ориентироваться в перспективе на высокую стабильность эмиттеров даже в условиях технического вакуума.

### 3. Технологии производства новых наноматериалов и устройств в качестве рабочих элементов (структур)

#### Технологии производства новых материалов и устройств с углеродными нанотрубками в качестве рабочих элементов

В [31] со ссылками на отечественные источники [32 – 38] приведен обзор по технологиям производ-

ства новых материалов и устройств на основе углеродных нанотрубок (УНТ) применительно к созданию рабочих элементов. Приведены методы их получения, указаны организации, в которых проводились соответствующие исследования и получены интересные результаты. Отмечено, что в России рынок УНТ только начинает формироваться. Поскольку в процессе синтеза образуются смеси нанотрубок с различными параметрами, разделение которых представляет сложную задачу, получают развитие преимущественно направления, в которых допускается использование смесей УНТ [32, 33].

Ведущими разработчиками основных методов по развитию индустрии УНТ в России считаются следующие организации.

1. Лабораторные методы получения УНТ разработаны: в Институте проблем физической химии РАН, Центре естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, на Химическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова, в Институте неорганической химии СО РАН и Центре перспективных технологий в ходе выполнения государственного контракта № 02.513.11.3173 «Оптимизация технологических процессов синтеза УНТ различных модификаций и создание на их основе функциональных элементов нанoeлектроники»;

2. Технологии производства УНТ созданы в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова (НИФХИ), Московском химико-технологическом университете им. Менделеева и в Тамбовском государственном техническом университете.

3. По развитию индустрии УНТ идут работы в Федеральном агентстве по науке и инновациям Минобрнауки России. В частности, в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы» планируется обеспечить поддержку перспективных исследований и разработок на всех стадиях инновационного цикла: от генерации знаний до коммерциализации конкретных технологий.

Кроме того, фирма ООО «Карбонлайт» предлагает широкий спектр полученных в России одностенных и многостенных УНТ.

Ниже приведем ряд некоторых интересных результатов и отметим организации-исследователи по технологиям создания нанотрубок. В частности, в [31] приведены методы синтеза одностен-

ных и многостенных УНТ, а также направления создания технологий производства игл для зондовой микроскопии, насыщаемых поглотителей и полевых эмиттеров на их основе.

**Иглы для зондовой микроскопии.** В [31, 34 – 36] отмечено, что в сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) пространственное разрешение и точность отображения профиля исследуемой поверхности практически полностью определяются геометрией острия. Важны механическая прочность и химическая стойкость игл. Для реализации методов СЗМ требуются проводящие и магнитные зонды, и поиск новых зондирующих элементов чрезвычайно актуален, поскольку существующие конструкции зондов недостаточно удовлетворяют потребностям наноиндустрии и нанoeлектроники. Основные проблемы связаны с плохим контролем формы и недостаточно острыми кончиками зондов (их окислением, разрушением или затуплением при жестких контактах с поверхностями). Вместе с тем, механическое свойство УНТ – высокая прочность, во много раз превосходящая прочность стали, делает их подходящими объектами для использования в качестве кончиков игл для зондовой микроскопии. При жестком контакте с исследуемой поверхностью нанотрубки сгибаются, а после снятия нагрузки восстанавливают свою форму.

В [31] рассмотрены технологические этапы создания нанотрубок и их параметры, обоснованы требования, выполнение которых необходимо для надежной их работы в процессе создания и эксплуатации новых перспективных приборов, в том числе определяется:

- состав и размеры нанотрубки (несколько миниострий с радиусами закругления 4 – 10 нм и высотой более 20 нм);

- добротность модифицированных кантилеверов на воздухе (около 500, что соответствует добротности исходных кантилеверов);

- разрешающая способность сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) игл с прикрепленными на вершине УНТ (на основе платиновой пленки, поверхность которой сформирована кластерами с диаметром до 5 нм) и др.

Сделан вывод, что новая технология позволяет создавать устойчивые к деградации зонды с нанотрубкой на вершине острия для СЗМ с высоким пространственным разрешением.

**Насыщаемые поглотители.** В [31] отмечено, что пикосекундные и фемтосекундные лазеры открывают широкие перспективы для исследования быстрых процессов в физике, химии и



биологии. Ожидается, что сверхкороткие импульсы найдут применение при разработке новых технологий широкополосной связи. Создание лазеров со сверхкороткими импульсами стало возможным благодаря применению метода модуляции добротности, а также реализации режима синхронизации мод. Методы получения сверхкоротких импульсов могут быть осуществлены с использованием просветляющихся фильтров (насыщающихся поглотителей). Насыщающиеся поглотители с рабочей областью в ближнем ИК-диапазоне могут быть созданы на базе одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Возможность реализации режима самосинхронизации мод для различных лазеров с использованием насыщаемых поглотителей, содержащих ОУНТ, продемонстрирована в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН [37, 38].

В указанных работах приведены результаты анализа суспензий ОУНТ, которые подтверждают выводы о том, что в образцах присутствует большое число коротких пучков с длиной меньше 200 нм и диаметрами 5 – 25 нм. Длина сепарированных пучков не превышает 2 мкм, а укорочение нанотрубок является следствием ультразвуковой обработки суспензии. Для суспензий, содержащих ОУНТ, при увеличении энергии излучения с 3 до 150 мкДж коэффициент пропускания возрастал с 40 до 72 %.

Согласно [31] путем нанесения суспензии ОУНТ на твердую подложку (в описанных экспериментах – слюда) можно добиться хорошего распределения небольших пучков и индивидуальных ОУНТ по поверхности – до 20 шт. на  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>, что соответствует объемной концентрации нанотрубок порядка  $10^9$  мл<sup>-1</sup>.

Для более эффективного использования такого дорогого сырья, как УНТ, в процессе приготовления насыщаемых поглотителей требуется совершенствование процесса дезинтеграции ОУНТ. Ведутся работы по созданию опытных образцов долгоживущих полевых эмиттеров с высокой плотностью эмиссионных токов на основе УНТ.

### Технологии углеродных нанотрубок

Бурно развивающиеся технологии управления структурой вещества с атомного уровня позволяют получать нанотрубки, фуллерены и фуллереноподобные структуры двух типов: органические (углеродные и полимерные) и неорганические (как правило, на основе двухкомпонентных систем). Открытие фуллеренов и углеродных нанотрубок (УНТ) расширило представления об аллотропических модификациях углерода и положило начало

исследованиям их свойств [39] со ссылкой на работы [40 – 51]. Поясняется, что УНТ бывают одностенными и многостенными, имеют закрытую или открытую структуру, различны по свертке графенового листа относительно продольной оси (хиральность) [41], что меняет их физические свойства от полупроводника до проводника с очень низким сопротивлением.

### Нанотрубки, фуллерены и фуллереноподобные структуры

Полученные в 1992 г. результаты исследований показали, что нанотрубчатые и фуллереноподобные структуры формируются не только углеродом [42]. В частности, наночастицы слоистого соединения WS<sub>2</sub>, являясь нестабильными в плоской форме, спонтанно формируют закрытую структуру, родственную фуллеренам и УНТ. Такая нестабильность объясняется очень активными химическими связями атомов серы и вольфрама, которые появляются на границе слоев наночастицы. Эти нанообразования получили название «неорганические фуллереноподобные структуры» и «неорганические нанотрубки» (ННТ).

В отличие от графита, который состоит из монокристаллических углеродных листов, скрепленных ван-дер-ваальсовыми силами, неорганические двумерные структуры построены из сложенных молекулярных листов. Каждый лист в MoS<sub>2</sub>-нанотрубке состоит из слоя молибдена, зажатого между двумя слоями серы. Листы также соединяются силами Ван-дер-Ваальса. Особенность таких трубок состоит в том, что при сворачивании листа получается устойчивая, полностью законченная структура.

**Изготовление монокристаллических нанотрубок.** Существует несколько методик получения контролируемых по толщине и составу атомных слоев: молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ); метод Ленгмюра – Блджетт [42]; осаждение из газовой фазы; плазменное напыление; технология «Smart-cut» (формирование структур «полупроводник на изоляторе» за счет переноса тонкого слоя с монокристаллической пластины на оксидированную подложку).

Долгое время основными способами синтеза трубчатых наноструктур оставались гидротермальный синтез и осаждение из газовой фазы на катализаторе [43]. Для формирования наших наноструктур могут применяться также самосворачивание напряженной гетероструктуры и их съем с основы из нанопроволоки. Формирование оксидных нанотрубок может также осуществляться с

основы из УНТ с последующим ее удалением. Продемонстрирована возможность освобождения сверхтонких напряженных слоев с минимальной толщиной в два монослоя [44, 45]. Слои самоструктурируются в нанотрубки диаметром до 2 нм. Метод основан на формировании МЛЭ – напряженной гетеропленки, решетка которой подстраивается под решетку подложки.

Технология МЛЭ позволяет контролировать с высокой точностью толщину наращиваемых слоев и получать полупроводниковые трубки с гладкими стенками длиной до нескольких сантиметров с высокой адгезией к кремниевым подложкам, а также встраивать процесс их нанесения в уже существующие микроэлектронные технологии.

Продемонстрирована возможность создания квантовой точки из трубки нанометровой длины [46]. Отмечено, что для изготовления подобных квантовых точек необходимо использовать полупроводники с обогащенной поверхностью или металлы. По технологии самосворачивания изготовлены трубки SiGe/Si, InAs/GaAs, InGaAs/GaAs.

Другой технологией изготовления ННТ является их получение с основы. Метод напоминает металлургическое изготовление бесшовных труб. Сообщалось о получении с основы трубок GaN [47]. С использованием данного метода получены нанотрубки кремния [48], оксида кремния и шпинелевые [49]. Синтез последних базировался на эффекте Киркендалла (получение равновесной структуры при гетеродиффузии). Дальнейшее развитие метода позволяет создавать полимерные трубки с возможностью интеркаляции (введения внутрь трубок) в них металлов и полупроводников, получать нанотрубки из веществ, в том числе неустойчивых в любой другой форме.

Таким образом, создание закрытых и открытых структур с полостью можно осуществлять на основе уже существующих технологий практически из любого кристаллического материала. Исследования подтвердили, что получать подобные структуры совершенными можно из большинства неорганических веществ и полимеров, в том числе с использованием сравнительно дешевого и простого метода Ленгмюра – Блоджетт.

#### **Возможность применения неорганических нанотрубок**

Благодаря наличию внутреннего канала и большой теплостойкости ННТ перспективны для получения новых веществ путем их синтеза в полости канала. Применение в качестве нанореакторов для синтеза

новых веществ может быть объяснено уравнениями термодинамики оценкой внутреннего давления:

$$\delta F = -\delta H + T\delta S + p\delta V + \delta S, \quad (3)$$

где  $p = 2\delta/R$ .

При  $R = 5$  нм и  $\delta = 0,07$  Дж/м внутреннее давление будет выражаться зависимостью  $p = \frac{2 \cdot 0,07}{5 \cdot 10^{-9}} = 2,8 \cdot 10^7$  Па = 280 атм.

Поскольку наноструктурирование обеспечивает создание материалов с широким спектром свойств и имеет значительные возможности по изменению структуры, в [39] отмечены следующие основные области внедрения новых устройств и приборов: акустика и пьезомеханика; квазисверхпроводниковые применения; магнитотехника; механика (упругие и жесткие структуры); химия и технология радиоактивных и ядовитых веществ; гетероструктуры; сенсоры; получение квантовых нитей; синтез новых веществ в канале многостенной нанотрубки.

Благодаря наличию винтовой оси симметрии некоторые ННТ проявляют свойства пьезоэлектриков и перспективны в качестве элементов МЭМС и НЭМС. Для этих применений методом функционала плотности были смоделированы нанотрубки SiO<sub>2</sub> [53]. У нанотрубчатых образований наблюдается преимущественно перпендикулярная подложке ориентация.

Для ННТ, в том числе природных (хризотил, имоголит), наблюдается преимущественная ориентация в породе или на искусственно выращенной подложке, что связано, по-видимому, с ростом вклада поверхностной энергии в химический потенциал при уменьшении размера кристаллитов. Минимизация химического потенциала достигается за счет огранки по плоскостям с минимальной поверхностной энергией. В результате возникает текстура, являющаяся следствием неравновесности образования нанофазы.

В итоге сделаны следующие выводы.

1. ННТ – отдельный класс материалов, изменение спектра свойств которых возможно с использованием традиционных методов: легирования, сочетания слоев, модификации ионными пучками и т.д. Их применение перспективно для оптики и электроники, гибридных систем на чипе, катализа, снижения трения и износа, создания устройств для МЭМС и НЭМС.

2. Разработанные трубчатые наноструктуры обладают приемлемой адгезией к используемым в электронике материалам, и с применением суще-

ствующих технологических методов могут быть встроены в структуру изделий. Возможно получение микро- и нанотрубок заданных диаметра и длины, в том числе имеющих дискретный спектр электронов и обладающих параметрами квантовых точек. Изучение ННТ позволит также лучше понять природу того, как материал образует стабильные формы на атомном уровне.

### 3. Спектральные свойства композитов на основе углеродных нанотрубок и полипропилена в миллиметровом и сантиметровом диапазонах электромагнитных волн

В [52] исследованы частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости в материалах на основе многостенных углеродных нанотрубок в широких диапазонах частот 10 – 300 ГГц и температур 78 – 400 К.

При постановке научной задачи для сравнительной оценки результатов экспериментальных и теоретических исследований в [53 – 60] сделаны приведенные ниже пояснения.

Наука и технология углеродных нанотрубок (УНТ) имеет быстрое развитие в настоящее время и применимы для разработки перспективных материалов для широкодиапазонных поглотителей электромагнитных волн. УНТ предоставляют возможности для создания материалов с регулируемыми диэлектрическими и магнитными параметрами в широких границах. Такие материалы эффективны для создания лёгких по весу и тонких поглотителей с подходящими значениями коэффициента отражения [56].

В [52] проведено систематическое исследование комплексной диэлектрической проницаемости

композитов на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в полипропиленовой матрице в широких диапазонах частот 10 – 300 ГГц и температур 78 – 400 К.

В целях удобства исследований свойств нанотрубок были изготовлены четыре образца композитов на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в пропиленовой матрице с различными объёмными концентрациями МУНТ от 0,25 до 2,5 %. В таких материалах с относительно малыми концентрациями УНТ потери волны на толщине образца не слишком велики и приемлемы для измерений.

Для исследований были использованы МУНТ марок L-MWNT-10 (обозначаемые далее K1), SMWNT-4060 (обозначаемые далее K2) и L-MWNT-4060 (обозначаемые далее K3) производства Shenzhen Nano-Technologies Port Co., Ltd (Китай). Композиционные материалы на их основе в качестве наполнителя и полипропилена в качестве матрицы получали смешением нанотрубок и полипропилена при температуре выше температуры плавления полимера с использованием смесителя типа «Брабендер» с дальнейшим прессованием полученной смеси в пресс-форме. Объёмные концентрации МУНТ в композите составляли 0,25, 0,5, 1,5 и 2,5 % в образцах 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Геометрические размеры образцов в виде плоскопараллельных пластин составляли  $24 \times 22 \times 0,46 \text{ мм}^3$ ,  $26 \times 21 \times 0,465 \text{ мм}^3$ ,  $45 \times 27 \times 0,285 \text{ мм}^3$  и  $53 \times 22 \times 0,475 \text{ мм}^3$  в образцах 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В работе проведены экспериментальные и теоретические исследования параметров материалов на сантиметровых и миллиметровых волнах. Там же подробно представлены методики и модели для проведения исследований (табл. 2).

**Таблица 2.** Результаты измерений действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в указанных выше четырёх образцах композитов на основе МУНТ в диапазоне частот  $f = 10\text{--}300$  ГГц при комнатной температуре

Образец	Частота, ГГц							
	11		30		138		274	
Тип, конц. МУНТ	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$
NT26(K1) 0,25 % об.	2,48	0,049	2,27	0,6	2,89	0,1	2,91	0,03
NT26(K2) 0,5 % об.	2,6	0,043	2,39	0,85	3,24	0,2	2,47	0,06
NT26(K3) 1,5 % об.	5,84	0,84	5,13	1,8	5,2	1,0	4,59	0,8
NT26(K2) 2,5 % об.	5,95	0,65	6,05	2,2	5,2	1,4	5,44	1,3

Были проведены также измерения параметров данных образцов при различных температурах  $T = 78 - 400$  К на частотах 30, 138 и 274 ГГц. Измерения при более высоких температурах не были возможны, так как температура плавления полипропилена лишь немного превышает 400 К.

Из проведенных измерений следует, что параметры материалов практически не зависят от температуры в пределах погрешности измерений в указанном диапазоне температур.

Сравнительная оценка результатов экспериментальных и теоретических исследований позволила сделать следующие выводы.

1. Систематические исследования диэлектрических свойств материалов на основе углеродных нанотрубок в широких диапазонах частот 10 – 300 ГГц и температур  $T = 78 - 400$  К проведены впервые.

2. При исследовании частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости в композитных материалах с многостенными углеродными нанотрубками в полипропиленовой матрице обнаружен максимум диэлектрических потерь в миллиметровом диапазоне.

3. Предложена теоретическая модель, объясняющая природу диэлектрических потерь на основе представления о том, что нанотрубки группируются в кластеры, в которых нанотрубки находятся в электрическом контакте между собой со значительно более низкой проводимостью контактов по сравнению с внутренней проводимостью нанотрубок. Данная модель хорошо описывает спектр диэлектрических потерь во всём диапазоне частот проведенного исследования.

4. Из проведенных температурных измерений следует, что параметры материалов не зависят от температуры в пределах погрешности измерений. Это можно связать с тем, что потери обусловлены электрической проводимостью неполупроводникового типа.

Данная работа выполнялась при поддержке РФФИ (проект 06-02-39032) и Национального фонда естественных наук (Китай).

#### **Углеродные нанотрубки для решения задачи создания приборов нового поколения**

В [61] отмечено, что углеродные нанотрубки – большой класс материалов, многие из которых обладают рекордными свойствами и признаны од-

ним из десяти важнейших достижений материаловедения за последние 50 лет.

Идеальные нанотрубки имеют плотность не более  $2 \text{ г/см}^3$ , проводят электрический ток баллистически и не подчиняются закону Ома; плотность тока достигает  $10^8 - 10^{10} \text{ А/см}^2$  и превышает на два-три порядка значения, свойственные металлам и сверхпроводникам; теплопроводность может составлять  $3000 \text{ Вт/(м·К)}$  и превосходить значения для алмаза. Модуль Юнга имеет значение до 1,2 ТПа. Нанотрубки при введении в очень небольших количествах в полимерные или керамические матрицы резко меняют их свойства, являясь полифункциональным наполнителем.

НТЦ «Гранат» по разработкам РХТУ им. Д.И. Менделеева с 2008 г. эксплуатирует пилотный реактор, позволяющий производить от 50 до 100 г/ч нанотрубок (в зависимости от их типа), и поставляет их по ценам от 50 до 500 руб./г с перспективой снижения на один-два порядка при развитии производства.

Результаты разработок ВИАМ, ИПХП РАН и РХТУ им. Д.И. Менделеева показали, что введение 0,05 – 0,10 мас.% нанотрубок в полимерные матрицы повышает их механические характеристики (например, трещиностойкость, на 50 – 70 %) и позволяет заметно снизить массу изделий при сохранении их прочности. Нанотрубки также придают полимерам способность эффективно поглощать и рассеивать электромагнитное излучение, повышают их тепло- и морозостойкость.

Созданы покрытия из нанотрубок, способные поглощать и рассеивать 99,955 % падающего света. По зарубежным данным, провода из нанотрубок в перспективе могут эффективно заменить металлические кабели. Как и эффективные материалы для актюаторов (преобразование электрической энергии в механическую) материалы из нанотрубок не имеют аналогов.

Простейшие конструкции, созданные в университете Цинциннати (США), показали возможность использования нанотрубок в качестве сверхлегких радиоантенн. Описаны прототипы эффективных излучателей из нанотрубок. За рубежом предполагается использовать композиты с нанотрубками в качестве покрытий радаров для изготовления деталей, имеющих низкий коэффициент трения и не накапливающих зарядов статического электричества.



#### 4. Актуальные исследования Российской академии наук в области нанотехнологии и нанoeлектроники применительно к системам радиолокации и связи

В качестве общих проблем можно предложить, например, следующие

1. Разработка программы создания нанофазных материалов, исследование их свойств и разработка на их основе новых технологий, устройств и электронных приборов, создание объемных и планарных наноструктур с уникальными физическими характеристиками, состоящих из наночастиц, отдельных крупных молекул, органометаллических молекулярных кластеров и лигандов.

2. Совершенствование программы развития основ наноматериалов, позволяющих наиболее ярко и полно реализовать их преимущества в создании углеродных нанотрубок, обладающих малым размером (диаметр отдельных нанотрубок 0,7 – 1,0 нм, длина – до нескольких миллиметров), хорошими электро- и теплопроводностью, полупроводниковым или металлическим характером проводимости, высокой подвижностью носителей заряда, развитой удельной поверхностью, низкой плотностью, химической и электрохимической стойкостью, малым значением порога перколяции в матрицах из диэлектриков, а также способностью к химической функционализации.

##### Пути решения проблем

1. Разработка технологического процесса на базе нанофазных композитных структур, содержащих как гомо- так и гетеро- металлические наночастицы, а также их оксиды и неорганические наночастицы (Co, Fe, Ni и др.), обладающих легкостью изменения функциональных свойств, позволит разработать новое поколение радиоэлектронных устройств: широкополосные прецизионные детекторы и смесители; аттенюаторы; эквивалентные нагрузки; фильтры мод и гармоник радиосигнала, обеспечить экологическую защиту биообъектов, а также решение задач помехозащищенности и формирования адаптивных характеристик радиоэлектронной аппаратуры.

2. Разработка приоритетных материалов на основе нанотехнологий для создания изделий (базы) для практического применения в микроволновой аппаратуре в качестве распределенных нелинейных элементов (заполнение волноводных трактов и резонаторов, тонкопленочное покрытие, электромагнитные экраны и т.д.), а также ряда но-

вых устройств для преобразования электромагнитных сигналов и элементы активной стелс-технологии, в том числе:

- радиопоглощающих материалов нового поколения с нелинейными характеристиками на основе эффектов поглощения и рассеяния электромагнитных волн в нанофазных средах в широком диапазоне частот (рассеяние электромагнитной энергии с помощью преобразования частоты и генерации гармоник (пассивная стелс-технология));

- наноструктурированных материалов с памятью и системой управления (управляемые диэлектрические и магнитные характеристики «Smart Materials», поляризованные среды, активно взаимодействующие с электромагнитным полем, материалы с туннельным характером проводимости).

- распределенных радиоэлектронных устройств на основе управляемых нового поколения характеристик нанофазных композитных материалов (управляемые распределенные микрополосковые устройства в широком СВЧ-диапазоне – детекторы, смесители, умножители, генераторы, модуляторы, фазовращатели, аттенюаторы и др.), а также телекоммуникационной аппаратуры (компактные радиотерминалы сотовой и спутниковой связи и др.);

- материалов для сверхплотной магнитной памяти на основе однодоменных магнитных наночастиц (магнитная и магнитооптическая запись информации).

##### Возможные направления проведения НИР на ближайшую перспективу

Проведение поисковых исследований создания перспективных полупроводниковых технологий, реализующих стандартную схемотехнику и архитектуру построения аналоговых и цифровых электронных устройств, имеющих определенные физические ограничения, связанные с размером, быстродействием и энергопоглощением (и энерговыделением) единичного элемента, а также степенью интеграции элементов в рамках традиционной планарной технологии.

1. *Изучение предельных параметров для разработки единичных электронных устройств элементной базы нового поколения на основе:*

- использования электронных устройств на единичных молекулах;

- изменения (квантового) состояния электронного устройства под воздействием единичного электрона;

- изменения (квантового) состояния электронного устройства под воздействием единичного фотона;

- использования квантовых связей для взаимодействия между единичными молекулярными электронными устройствами при формировании на их основе системной инфраструктуры.

*2. Теоретические и экспериментальные разработки молекулярных электронных устройств, в том числе:*

- изучение физико-химических технологий для реализации молекулярных кластерных веществ с заданными физическими свойствами, необходимыми для технологий применения и организации электронного транспорта;

- нанотехнологические методы для модификации поверхности и создания наноструктур на основе атомарных и молекулярных объектов (в том числе и биоорганических);

- изучение процессов формирования и самоорганизации наночастиц и молекулярных кластеров различными методами;

- создание физической модели процессов формирования и самоорганизации молекулярных объектов;

- создание методик (на основании физической модели) формирования одномерных, двумерных и трехмерных туннельных наноструктур;

- создание технологии получения нанопроводников из кластерных веществ, металлосодержащих наночастиц и нанотрубных объектов;

- создание локальных методов исследования физических свойств наноструктур на молекулярном и атомарном уровнях (микроскопия и спектроскопия проводящих и непроводящих объектов, в том числе и биоорганических, ИК-спектроскопия);

- исследование эффектов электронного транспорта через сложные (в том числе магнито-чувствительные) молекулярные наноструктуры при различных физических температурах, включая одноэлектронику, резонансные эффекты, эффекты индуцирования проводимости и оптического излучения;

- создание физической модели спинполяризованного электронного туннельного транспорта в наноструктурах со сложным туннельным барьером и пониженной размерностью (нульмерные объекты – квантовые точки, одномерные объекты – нанопроводники, двумерные объекты – нанослои), теоретическое исследование процессов переноса заряда при воздействии внешнего электромагнитного поля;

- создание систем наноструктур на квантовых связях, использующих архитектуру нейросетей и клеточных автоматов и позволяющих схемотехнически реализовать компактную двумерную (трехмерную) структуру из отдельных активных элементов с высокой степенью интеграции, доступ к которым возможен с помощью периферийных элементов, расположенных по периметру (поверхности) компактной структуры.

*3. Создание различных материалов и приборов на основе разработанных молекулярных электронных устройств и нанотехнологий путем разработки:*

- нанофазных материалов с уникальными физико-химическими свойствами: полимерные композиты, магнитные пластмассы, адаптивные материалы с управляемыми физическими (в том числе электромагнитными, например, пиро- и пьезоэлектрики) характеристиками (smart materials), материалов для стелс-технологии (адаптивные радиопоглощающие покрытия нового поколения на основе наноструктурированных композитных материалов), материалов для нанохимии и нанобиологии;

- чувствительных сенсорных датчиков на различные химические вещества (электронный нос) для химических анализаторов, экологических целей и целей обеспечения безопасности;

- сверхчувствительных детекторных устройств нового поколения на основе созданных молекулярных наноструктур для различных электромагнитных диапазонов (в том числе и в оптике – нанофотоника), при этом устройства могут иметь вид как отдельных точечных элементов, так и распределенных активных и пассивных систем различной конфигурации, размещенных непосредственно в электромагнитном тракте и антенных системах;

- элементной базы для вычислительных устройств нового поколения, архитектура которых основана на применении нейронных сетей и теории клеточных автоматов, реализующих конвейерный (параллельный) способ обработки информации и многоразрядную логику (в отличие от современных ЭВМ, в которых применяется последовательный способ обработки информации и бинарная логика, а вычислительная мощность наращивается за счет быстрого действия единичного элемента);

- молекулярных устройств памяти сверхвысокой емкости с произвольным доступом, основанной на применении новых информационных технологий, связанных с кодированием информации с помощью дискретных детерминированных хаотических алгоритмов.

- устройств (на основе молекулярных туннельных наноструктур), реализующих коррелированный электронный транспорт (например, одноэлектронный транзистор) и различных прецизионных приборов на их основе: молекулярный электрометр и прецизионные сканирующие зарядочувствительные датчики, сканирующий молекулярный термометр, наномеханические датчики перемещения, наноакселерометры, наносейсмометры и наногравиметры.

### Ожидаемые результаты

1. Разработка программы создания нанофазных материалов, исследование их свойств и разработка на их основе новых технологий, устройств и электронных приборов, создания объемных и планарных наноструктур с уникальными физическими характеристиками, состоящих из наночастиц, отдельных крупных молекул, органометаллических молекулярных кластеров и лигандов позволит реализовывать «умные» адаптационные материалы с заранее заданными свойствами, которые могут меняться под воздействием параметров внешней среды и, в частности, внешнего электромагнитного поля.

2. При создании различных материалов и приборов на основе разработанных молекулярных электронных устройств и нанотехнологий появляются возможности выполнения работ напылительными установками, установками реактивного ионного травления, установкой лазерного напыления, электронным микроскопом для целей электронной литографии; установкой совмещения и экспонирования, малоугловым рентгеновским дифрактометром для контроля структуры тонких пленок, установкой для очистки воды, электроизмерительным стендом для исследования микро- и наносхем, сканирующим туннельным микроскопом, ленгмюровским оборудованием для нанесения мономолекулярных пленок, ИК-спектрофотометром, ЭПР- и ЯМР-спектрометрами, СВЧ-аппаратурой и радиоизмерительным оборудованием, а также парком современных персональных компьютеров, подключенных к сети Internet;

3. При разработке элементной базы для вычислительных устройств нового поколения, архитектура которых основана на применении нейронных сетей и теории клеточных автоматов, реализующих конвейерный (параллельный) способ обработки информации и многоразрядную логику (в отличие от современных ЭВМ, в которых применяется последовательный способ обработки

информации и бинарная логика, а вычислительная мощность наращивается за счет быстродействия единичного элемента), будут реализованы все преимущества молекулярных наноструктур: высокая степень интеграции, низкое энергопотребление, использование квантовых связей между отдельными элементами, возможность создания объемных трехмерных электронных устройств, возможность синхронной работы всех элементов системы при тактировании внешним электромагнитным сигналом (в том числе и оптическим). Разработка таких систем внесла бы кардинальные перемены в решение проблемы создания искусственного интеллекта.

4. *Некоторые освоенные, разрабатываемые или упомянутые области военного применения углеродных нанотрубок могут быть следующие:*

а. Введение небольших количеств углеродных нанотрубок в полимеры (волокна, пленки) придает композитам повышенные механические свойства, что позволяет облегчить и сделать более прочными многие средства индивидуальной защиты (бронежилеты, каски — снижение массы, повышение надежности), детали летательных аппаратов (самолеты, вертолеты, ракеты — снижение массы, расхода топлива, повышение дальности) и наземных транспортных средств. Углеродные нанотрубки как упрочняющие наполнители пока не имеют аналогов.

б. Введение определенных количеств углеродных нанотрубок придает полимерам электропроводность. Небольшие добавки позволяют предотвращать накопление статических зарядов, средние — поглощать и рассеивать электромагнитное излучение (антирадарная защита; стэлс). Нанотрубки здесь превосходят металлы благодаря значительно меньшей плотности (около  $2 \text{ г/см}^3$ ) и сажу из-за нитевидной формы (отношение длины к диаметру достигает сотен и тысяч, что позволяет на порядки уменьшить концентрацию добавок). Углеродные нанотрубки, как предполагается, могут использоваться для создания нелетального оружия (выведение из строя электроподстанций, полевых электрогенераторов, антенн радаров).

в. Углеродные нанотрубки являются идеальным материалом для разнообразных сверхминиатюрных химических сенсоров (например, для обнаружения взрывчатых или отравляющих веществ по анализу воздуха), биосенсоров, датчиков скорости, напряжения, для сенсорных экранов и др. Разрабатывается устройство в виде узкой полоски,

наклеивающейся на грудь солдата и содержащей набор сенсоров и микрорадиопередатчик.

Непрерывное измерение электропроводности механически напряженных деталей позволяет контролировать их механическую устойчивость (например, появление микротрещин в несущих винтах вертолетов). Пленки композитов с нанотрубками могут выполнять роль интеллектуальных материалов.

Нанотрубки могут использоваться для создания миниатюрных приборов аэродинамического контроля.

г. Из углеродных нанотрубок изготовлены лабораторные прототипы актюаторов (преобразователи электрических сигналов в механическую энергию), способных в перспективе работать в жестких условиях (вакуум, ядовитые среды, повышенные температуры) и при соответствующей разработке превзойти силу человеческих мускулов. Наиболее близкое применение — стеклоочистители смотровых окон космических кораблей.

д. Рекордно высокая теплопроводность углеродных нанотрубок (3000 – 6000 Вт/(м·К)), на порядок превышающая значения для металлов, позволяет создавать композиты для тепловых стоков (например, для отвода тепла от блоков управления космических кораблей и ракет). Они необходимы для развития силовой электроники.

е. Большие усилия прилагаются для создания сверхминиатюрных электронных приборов на основе углеродных нанотрубок (диоды, транзисторы, переключатели, элементы памяти, логические элементы и др.). Уже разработаны приборы на одиночных нанотрубках.

ж. Из углеродных нанотрубок можно создать гибкие прозрачные электропроводные пленки для оптоэлектронных приборов (например, для солнечных батарей) взамен оксидов индия-олова. При этом по большинству показателей пленки из нанотрубок могут превзойти оксиды. Пленки из углеродных нанотрубок могут быть столь тонкими, что, например, масса квадратного километра изготовленного из них солнечного паруса не превысит 30 кг.

з. Добавки углеродных нанотрубок в ракетное топливо позволяют регулировать скорость горения. Считается весьма перспективным введение углеродных нанотрубок во взрывчатые вещества.

и. Появляется возможность применения покрытий из нанотрубок, непрозрачных в ИК-диапазоне, в качестве средства маскировки объектов от наблюдения приборами инфракрасного видения.

Существует проект снабжения армии США тонкими электропроводными пленками из углеродных нанотрубок (Naval Research Laboratory, США). Кратко описан проект по испытанию аэрозоля из углеродных нанотрубок в качестве фильтра (завеса) ИК-излучения.

к. Предполагается использование покрытий из пленок в боевых ракетах. Описан проект ракеты с покрытием из нанотрубок («мининьюк») для уничтожения глубоких подземных бункеров.

л. Углеродные нанотрубки, функционализированные или декорированные нанотрубки, полимеры с нанотрубками могут применяться для создания теплозащитных и антифрикционных покрытий, молниезащитных панелей самолетов, демпфирующих устройств, люминесцентных экранов, подсвечивающих устройств в жидкокристаллических дисплеях, светодиодов, фильтров для агрессивных сред и ряда других применений. Рассматривается возможность создания на основе нанотрубок средства для обеззараживания воды.

м. На основе функционализированных углеродных нанотрубок создается средство для снижения воздействия ионизирующего излучения на организм.

н. Несколькими фирмами ведутся разработки «космического лифта» с тросом из углеродных нанотрубок для новой, более дешевой по сравнению с использованием ракет, системы вывода грузов на околоземную орбиту.

о. Существуют технически слабо обоснованные проекты использования углеродных нанотрубок (например, в качестве множественных «пуль» для поражения спутников).

## 5. Состояние работ за рубежом за 2006-2009 годы

### Структуры с углеродными нанотрубками (для новых применений в наноэлектронике)

1. *Монолитная интеграция КМОП СБИС и углеродных нанотрубок для гибридных применений нанотехнологии.* Рассматривается, что на одной подложке были интегрированы углеродная нанотрубка (CNT) со стандартной КМОП СБИС для гибридных применений нанотехнологии [D. Akinwande, et al. *Monolithic Integration of CMOS VLSI and Carbon Nanotubes for Hybrid anotechnology Applications // IEEE Transactions on Nanotechnology. Sept. 2008. V.7. Issue:5. P. 638-639*]. В интегрированном устройстве совмещаются преимущества КМОП- и CNT-технологий. Такие приме-



нения включают оптические, биологические, химические и газовые датчики на базе CNT, для которых требуются сложные КМОП-схемы для контроля, калибровки и обработки сигнала. Была продемонстрирована схема на одном кристалле, включающая схему канала связи, двухтранзисторный каскадный мегагерцевый усилитель, в котором используются кремниевые *n*-канальные МОП-транзисторы и CNT-транзисторы с общей потребляемой мощностью 62,5 мВт.

**2. Возможности использования нанотехнологии для уменьшения нагрева ИС.** Исследователи Purdue University изучают возможность решения проблемы теплоотвода посредством использования углеродных нанотрубок [J. McHale. *Purdue researches look at nanotechnology to reduce computer-chip heating. Military & Aerospace Electronics. Aug. 2006*]. Делается попытка создания такого материала, который располагается между кремниевыми кристаллами и металлическими теплоотводами, заполняет зазоры и неровности между поверхностями кристалла и металла для усиления теплового потока между ними. Исследователи использовали несколько видов тепловых интерфейсных материалов на базе углеродных нанотрубок, включая нанопокрывание типа Velcro. Последние исследования показали, что интерфейс на базе нанотрубок обеспечивает теплоотвод, в несколько раз больший, чем в случае интерфейса из обычных материалов при одной и той же температуре. Если при использовании обычных интерфейсных материалов температура значительно повышается, то при использовании покрытия из матрицы нанотрубок температура повышается не более, чем на 15 °С. Нанопокрывание, получившее название «тепловой интерфейс из углеродных нанотрубок» может наноситься на поверхность кристалла и теплоотвода. Ожидается, что значительный эффект может быть получен от совместного использования материала из нанотрубок и обычного интерфейсного материала. Проводимые исследования поддерживаются Национальным научным фондом. При этом ставится задача разработки миниатюрной техники охлаждения, пригодной для использования в электронных устройствах, компьютерах, телекоммуникационном оборудовании и авиационной технике. Исследования в области применения силовой электроники поддерживаются исследовательской лабораторией ВВС в содружестве с Birck Nanotechnology Center.

**3. Обзор последних достижений в области полупроводниковых наноматериалов,** которым предстоят многообещающие применения (наноструктуры, магнитные полупроводники и спинтроника) [P. Kervalishvili, A. Lagutin. *Nanostructures, magnetic semiconductors and spintronics // Microelectronics Journal. 39. 2008. P. 1060-1065*]. Это касается, в частности, материалов со спин-поляризованным транспортом носителей заряда. Показано, что на базе последних теоретических и экспериментальных достижений развитие разбавленных полупроводников с контролируемой неупорядоченностью и широкой запрещенной зоной, а также исследование их молекулярных структур являются очень перспективными направлениями для производства новых магнитных полупроводников.

**4. Полупроводниковая промышленность в состоянии улучшить характеристики электронных систем** еще в течение более четырех десятилетий за счет изготовления и использования приборов с постоянно уменьшающимися размерами [Ph. Avouris, et al. *Carbon-based electronics. Nature nanotechnology. V.2. Oct. 2007. P. 605-615*]. Электроника на базе углерода скоро столкнется как с научными, так и техническими проблемами, что вынуждает промышленность искать альтернативные технологии создания приборов. В статье рассматривается прогресс, который был достигнут в использовании углеродных нанотрубок и (совсем недавно) в использовании графенов и нанолент. Уже продемонстрированы полевые транзисторы, реализованные на полупроводниковых нанотрубках и графеновых нанолентах. Металлические нанотрубки могут быть использованы для реализации межсоединений с высокой пропускной способностью. Кроме того, благодаря превосходным оптическим свойствам нанотрубок можно изготавливать как электронные, так и оптоэлектронные приборы из одного и того же материала.

**5. Прогресс и перспективы использования углеродных нанотрубок для создания быстродействующих электронных устройств** является уже доказанным. Приборы на углеродных нанотрубках имеют существенные преимущества в плане реализации быстродействующей логики [J. Arpenzeller. *Carbon Nanotubes for High-Performance Electronics – Progress and Prospect. Proceedings of the IEEE, Feb. 2008. V. 96. Issue:2. P. 201 – 211*]. Сверхмалые размеры нанотрубки (диаметр трубки) является ключевой особенностью, которая позволяет значительное масштабирование длины ка-

нала, в то время как внутренние транспортные свойства нанотрубки обеспечивают высокие значения токов. Следует отметить, что узость трубки является критичной для реализации новых приборных концепций, например, туннельного транзистора. При понимании уникальных возможностей углеродных нанотрубок и использовании их в необычных конструкциях становятся возможными новые наноэлектронные применения. Однако должен быть обеспечен гораздо лучший контроль материалов и должны быть разработаны новые технологические процессы до реализации указанных применений.

6. **Современное состояние исследований в области реализации межсоединений на углеродных нанотрубках (CNT).** В [K. Banerjee, et al. *Current Status and Future Perspectives of Carbon Nanotube Interconnects. 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 18-21 Aug. 2008. P. 432 – 436*] рассматриваются в плане изготовления и моделирования проблемы изготовления вертикальных и горизонтальных CNT-межсоединений и другие нерешенные проблемы. Представлены моделирование одностенных и многостенных углеродных нанотрубок и анализ характеристик. Обсуждается влияние высокой частоты, применения вне кристалла и вариации процесса создания CNT-межсоединений.

7. **Большое применение в наноэлектронике находят углеродные нанотрубки** [(1) Ch. Hierold. *Concepts for carbon nanotube sensors. International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 10-14 June 2007. P. 5-10*; (2) Ch. Hierold, et al. *Nano electromechanical sensors based on carbon nanotubes. Sensors and Actuators A: Physical. 1 May 2007. V. 136. Issue 1. P. 51-61*]. В указанных работах отмечается о такой реализации датчиков на основе углеродных нанотрубок. В первой работе излагается концепция реализации механических и химических датчиков на основе углеродных нанотрубок. Внимание было сфокусировано на одностенных углеродных нанотрубках как «простых» макромолекулярных функциональных структурах с возможностью интеграции в микро- и наносистемы. Обсуждаются основные особенности изготовления. Прилагается обширный перечень ссылок.

В другой указанной работе рассматриваются наноэлектромеханические датчики на основе углеродных нанотрубок. Излагаются концепции и демонстрационные примеры наноэлектромеханических датчиков на базе углеродных нанотрубок (CNT). Во первых, приводятся и обсуждаются раз-

личные концепции преобразователей, основанных на уникальных электрических, механических и электромеханических свойствах одностенных углеродных нанотрубок (SWNT). Во вторых, представлены технология изготовления и методы интеграции SWNTs в микро- и наносистемы. Наконец, приводятся описание и характеристики демонстрационных образцов кантилеверных структур на базе подвешенных SWNT и нанотрубчатого датчика давления на базе мембраны. Электромеханические измерения, выполненные на указанных тестовых приборах подтвердили SWNT в качестве исключительного пьезорезистивного электромеханического преобразователя с показаниями измерений, далеко превышающими значения современных тензодатчиков.

8. **Перспективными для создания электронных устройств показали себя полупроводниковые углеродные нанотрубки (CNTs),** в особенности в гибком исполнении [*Promising future for nanotube-based electronics. Materialstoday, Aug. 21. 2008*]. Однако существует проблема разделения полупроводниковых и металлических нанотрубок, присутствующих в исходном материале. Группа ученых из Стэнфордского университета и исследовательского института фирмы Samsung использовали «bottom-up» для полного устранения металлических нанотрубок из прибора. Процесс осуществляется на поверхностном оксидном слое, функционирование которого ограничивается силановыми группами, ограниченными аминами и фенилами. Если CNTs наносятся на такую поверхность пластины, то полупроводниковые трубки прилипают преимущественно к поверхности, ограниченной аминами.

9. **Высокочастотные субмикронные транзисторы с использованием совмещенных матриц одностенных углеродных нанотрубок** появились в последнее время. Уникальные электронные свойства одностенных углеродных нанотрубок (SWNTs) делают их многообещающими для создания электронных устройств будущих поколений, особенно в системах, требующих работы на высоких частотах [C. Kocabas, et al. *High-Frequency Performance of Submicrometer Transistors That Use Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes. Nano Letters. 2009. V. 9 (5). P. 1937-1943*]. Транзисторы, включающие качественно совмещенные параллельные матрицы SWNTs, избегают практических ограничений приборов, в которых используются отдельные трубки, и они также

позволяют выполнить полную экспериментальную и теоретическую оценку внутренних свойств. Так, приборы, состоящие из матриц, представляют практический маршрут для использования SWNTs в ВЧ-приборах и схемах. Представленные в статье результаты показывают многие аспекты работы приборов при такой топологии матриц, включая полную совместимость с обычными малосигнальными моделями ВЧ-диапазона. Приборы с субмикронной длиной канала показывают частоты при единичном усилении тока ( $f_i$ ) и при единичном увеличении мощности ( $f_{\text{тах}}$ ) 5 и 9 ГГц соответственно с параметрами рассеивания, количественно согласующимися с расчетными. Малосигнальные модели приборов обеспечивают важные внутренние параметры: скорость насыщения  $1,2 \cdot 10^7$  см/с и внутренние значения  $f_i = 30$  ГГц при длине затвора 700 нм, увеличиваясь с уменьшением длины. Результаты обеспечивают четкое представление проблем и возможностей SWNTs матриц в ВЧ-электронике.

### Применение углеродных нанотрубок

1. **Использование произвольных сетей и ориентированных матриц из одностенных углеродных нанотрубок в электронных приборах.** Одностенные углеродные нанотрубки (SWNTs) в форме сверхтонких пленок произвольных сетей, ориентированных матриц с промежуточными элементами между ними обеспечивают необычный тип материала, который может быть интегрирован в схемы обычным масштабируемым способом [Q. Cao, J.A. Rogers. *Random Networks and Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes for Electronic Device Applications. Nano Reseach. 2008. 1. P. 259 – 272*]. Электрические, механические и оптические свойства таких пленок в определенных случаях могут обеспечить замечательные характеристики отдельных SWNTs, делая их привлекательными для применения в электронных устройствах, датчиках и прочих системах. В статье обсуждается синтез и сборка SWNTs в тонкопленочные архитектуры различных типов, представлены примеры их использования в цифровых электронных схемах с уровнями интеграции, приближающимися к 100 транзисторам, и в аналоговых высокочастотных системах с рабочей частотой в несколько гигагерц, включая транзисторный радиоприемник, в котором SWNT-транзисторы обеспечивают выполнение всех активных функций. Результаты представляются важным шагом в развитии электронной технологии на базе SWNT, которая может

найти применение в гибкой электронике, ВЧ-аналоговых приборах и др., что может дополнить возможности используемых систем.

2. **Изготовление полевых транзисторов с использованием углеродных нанотрубок.** Полупроводниковые материалы  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  были использованы в качестве контактных материалов к истоку и стоку при изготовлении полевых транзисторов с использованием углеродных нанотрубок (CNTFETs) [Z.Xiao, et al. *The fabrication of carbone nanotube field-effect transistors with semiconductors as the source and drain contact materials, Nanotechnology, 1 Apr. 2009*]. Сверхочищенные одностенные углеродные нанотрубки (SWCNTs) были диспергированы в порошке N-метилового пирролидона.

3. **Изготовление и свойства полевой эмиссии эмиттерных матриц на базе углеродных нанотрубок триодного типа.** В [J. Wu, et al. *Fabrication and Field Emission Properties of Triode-Type Carbon Nanotube Emitter Arrays. Nano Letters. 2009 (2). P. 595-600*] сообщается об эффективном методе изготовления полевых эмиттерных матриц из большого числа микрозатворных углеродных нанотрубок триодного типа. В технологии совмещаются техника сфокусированного ионного луча и химическое осаждение из паровой фазы, стимулированное плазмой. При этом исключаются трудоемкая литография и мокрые химические операции, обычно используемые при изготовлении таких структур. Тестирование полевой эмиссии выявило, что увеличение затворного напряжения даже до 0,3 В оказывает значительное воздействие на локальные электрические поля, снижая уровень включения и пороговое поле до 3,6 и 3,0 В/мкм соответственно. Коэффициент усиления поля эмиттерных матриц был также увеличен с 149 до 222. Квантовая механическая модель такой полевой эмиссии триодного типа показывает, что локальное электрическое поле, генерируемое отрицательно или положительно смещенным затвором, прямо влияет на толщину туннельного барьера и, таким образом, на достижимый эмиттерный ток.

4. **Новый трехмерный полевой транзистор на основе одностенных углеродных нанотрубок.** В [S. Selvarasah et al. *A Novel Three Dimensional Field Effect Transistor Based on Single-Walled Carbon Nanotubes // 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 18-21 Aug. 2008. P. 18-21*] представлено описание конструирования, изготовления и тестирования нового трехмерного (3D) полевого транзистора на основе одностенных углеродных на-

нотрубок (SWNTs). Транзисторы были получены с использованием низкотемпературной диэлектроретической сборки. В качестве затворного диэлектрика с нелокальным верхним электродом затвора вокруг проводящего канала был использован конформный слой Polylen-C. Предварительные результаты показали бесполлярное поведение больше области  $p$ -типа, чем области  $n$ -типа. Транзистор показал отношение тока «on/off»  $3 \cdot 10^4$ , максимальное значение крутизны  $0,061 \text{ mV}^{-1}$  и подвижность  $85 - 277 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Данная 3D-CNTFET-технология может быть использована для реализации многослойных, компактных нанотрубчатых транзисторов с высокой плотностью размещения, в свою очередь, для реализации крупномасштабных наноэлектронных схем.

**5. Интегральные трехмерные микроэлектромеханические приборы из обработанных пластины с углеродными нанотрубками.** Чтобы быть полезными как микроэлектромеханические приборы углеродные нанотрубки с хорошо контролируемыми свойствами и ориентацией должны быть изготовлены с высокой плотностью и помещены в заранее намеченные места [Y. Hayamizu et al. *Integrated three-dimensional microelectromechanical devices from processable carbon nanotube wafers. Nature Nanotechnology. 2008. 3. P. 289 - 284*]. Данная проблема была решена посредством иерархической сборки углеродных нанотрубок на плотно упакованных и высоко совмещенных трехмерных пленках на пластине, из которых может быть изготовлен литографическим способом широкий диапазон сложных трехмерных нанотрубчатых структур. Сюда относятся островки из нанотрубок на подложке, подвешенные пластинки и балки, трехмерные кантилеверы, которые существуют как отдельные связанные приборы с полезными механическими и электрическими свойствами. Каждая технологическая операция является как параллельной, так и масштабируемой, что позволяет интегрировать эти структуры в системы на основе функциональных трехмерных наноприборов. Данный подход открывает новые пути для изготовления экономичных и масштабируемых приборов с беспрецедентными структурной сложностью и функциональными возможностями.

**6. Разработка транзистора на базе углеродной нанотрубки с временем задержки на затворе 5 пс.** Полупроводниковые углеродные нанотрубки привлекают к себе внимание прежде всего в качестве материала канала полевых тран-

зисторов, ввиду высокой подвижности носителей заряда [J. Svensson, et al. *A carbon nanotube gated carbon nanotube transistor with 5 ps gate delay. Nanotechnology. Issue 32. 13 Aug. 2008*]. В работе показано, что локальный CNT-затвор может значительно улучшить характеристику допороговой крутизны по сравнению с конструкцией с нижним затвором и обеспечивает задержку на затворе 5 пс. CNT-транзисторы с CNT-затворной функцией изготавливаются с использованием двух этапного метода осаждения из паровой фазы. Измеренные переходные характеристики оказались в очень хорошем соответствии с результатами теоретического моделирования, что подтверждает принцип работы транзисторов. Задержка на затворе менее 2 пс может быть легко достигнута посредством уменьшения толщины затворного диэлектрика.

**7. Использование в качестве материала межсоединений многостенных углеродных нанотрубок/нанокристаллических медных наноккомпозитных пленок.** Изготовлены наноккомпозитные пленки, включающие многостенные углеродные нанотрубки (MWCNTs) (диаметр  $10 - 40 \text{ nm}$ , длина  $1 \text{ mkm}$ ) и нанокристаллический медный слой с использованием недорогого электрохимического метода [J.J. Yoo, et al. *Multi-walled carbon nanotube/nanocrystalline copper nanocomposite film as an interconnect material. 58th Conference on Electronic Components and Technology. 27-30 May. 2008. P. 1282-1286*]. Благодаря импульсному осаждению с несколькими добавками, MWCNTs были хорошо распределены по пленкам по толщине. Для наноккомпозитных пленок характерна плотная структура без каких либо пустот. Для оценки использования в качестве электронных межсоединений были выполнены измерения модуля упругости, твердости, электрического сопротивления MWCNT/Cu наноккомпозитных пленок с использованием наноинденторного воздействия. Было установлено, что механические свойства усиливаются ввиду добавления MWCNTs, а электропроводность и теплопроводность наноккомпозитных пленок резко уменьшаются. Поэтому целесообразно проведение дальнейших исследований.

**8. Использование пленки на базе многостенных углеродных нанотрубок для считывания напряжения.** Пленки на базе многостенных углеродных нанотрубок (MWCNT) были подготовлены по методу раствора/фильтрации и прикреплены непосредственно на образцы посредством непроводящего клея [X. Li, et al. *Multiwalled*



carbon nanotube film for strain sensing. *Nanotechnology* 19. 2008]. Образцы затем подвергались циклам загрузки – разгрузки неосевых усилий для оценки их как датчиков напряжения. Для обеспечения хорошего электрического контакта между пленкой из углеродных нанотрубок и проводниками тонкий слой меди термически осаждался на оба конца пленки, как электроды, а проводники подсоединялись к электродам посредством серебряной пасты. Мосты Ветстоуна использовались для преобразования изменений сопротивления MWCNT в выходное напряжение. Результаты показали, что значения выходных напряжений пропорциональны значениям считываемых напряжений с индикатора напряжений. Было измерено влияние температуры на сопротивление и установлено, что сопротивление пленки MWCNT не зависит от температуры в диапазоне 273 – 363 К. Был также рассчитан оптимальный размер пленки для считывания напряжения. Динамические испытания показывают, что MWCNT способны выделять структурные особенности. Результаты эксперимента показывают, что MWCNT-пленка в перспективе может быть полезной для структурного мониторинга здоровья и для выполнения вибрационного контроля.

**9. Резистивная память на основе углерода.** В [F. Kreupl, et al. *Carbon-based resistive memory // IEEE International Electron Device Meeting, 15-17 Dec. 2008. P. 1-4*] предлагается углерод в качестве нового материала для резистивной памяти с точки зрения реализации энергонезависимых ЗУ. Рассматриваются три разновидности углерода: углеродные нанотрубки, проводящий углерод типа графена, изолирующий углерод. Успешно были продемонстрированы высокоскоростное переключение, а также потенциал многоуровневого программирования.

**10. Нанотрубки находят нишу в электрических переключателях.** Ученые Rice University и University of Oulu (Финляндия) выполняют тестирование углеродных трубок диаметром 30 нм на предмет использования их в щеточных контактах [*Nanotubes find niche in electric switches. www.smalltimes.com/articles/article\_display.cfm?ARTICLE\_ID=355895&p=109*]. Щеточные контакты представляют собой проводящие площадки, устанавливаемые к вращающемуся металлическому диску или валу с использованием подпружиненного рычага. Ток проходит от вращающегося диска через щеточные контакты к другим элементам прибора. При выполнении эксперимента исполь-

зовались обычные медноуглеродные композитные щетки электродвигателя малыми блоками, содержащими миллионы углеродных нанотрубок. Под электронным микроскопом эти блоки выглядят как плотно упакованный лес. Кроме того, известно, что указанный нанотрубчатый лес ведет себя как своего рода подушка, быстро восстанавливая свою форму после сжатия, тем самым значительно улучшается контакт, обеспечивая уменьшение потерь энергии на 90 %.

**11. Структурные и электрические характеристики полевых транзисторов на углеродных нанотрубках, изготовленных с использованием нового метода самосовмещенного выращивания.** В [L. Rispoli, U. Schwalke. *Structural and electrical characterization of carbon nanotube field-effect transistors fabricated by novel self-aligned growth method. 3rd International Conference on Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era. 25-27 March 2008. P. 1-5*] сообщается об изготовлении полевых транзисторов на углеродных нанотрубках (CNTFETs) с использованием недорогого технологического процесса, основанного на химическом выращивании углеродных нанотрубок (CNTs) из паровой фазы. Процесс выращивания CNTs осуществляется на всей поверхности пластины с использованием жертвенного катализатора Ni/Al. Процесс не содержит ни сложных манипуляций над SWNTs, ни многоступенчатых операций литографии, что исключает несовместимости. Каждая технологическая операция совместима с обычной КМОП-технологией. Изготовленные структуры представляют собой униполярные CNTFETs, работающие подобно *p*-MOSFETs с отношением on/off до  $3 \cdot 10^6$ .

**12. Развитие датчиков на основе углеродных нанотрубок.** Углеродные нанотрубки (CNT) проявили себя перспективными в качестве считывающих элементов в наноэлектромеханических датчиках [Mahar, B., et al. *Development of carbon nanotube-based sensors – a review // IEEE Sensors Journal. Feb. 2007. V.7. Issue 2. P. 266-284*]. В данном обзоре обсуждаются электрические, механические и электромеханические свойства CNT, которые используются в таких применениях. В исследовании указывается, на какие свойства нанотрубок надо обращать особое внимание при конструировании датчиков на базе нанотрубок. Приведены первоочередные технические приемы, которые должны использоваться для интеграции нанотрубок в приборы и дано описание датчиков, в которых использованы CNT в качестве активных считывающих элементов.

## Нанотехнологии

### Интеграция наноструктур

1. **Интеграция наноструктур с микросистемами.** В последние десятилетия применение микроэлектронных и микро/нанотехнологий для изготовления твердотельных приборов стимулировало увеличивающийся объем исследований в области микро/нано датчиков и исполнительных устройств [Lin, Liwei. *Integration of Nanostructures with Microsystems. 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Jan. 2007*]. Многообразие полупроводниковых и микро/наноматериалов предполагает создание систем с улучшенными возможностями и с улучшенным соотношением характеристики/стоимость по сравнению с обычными приборами. В данной статье обсуждаются современные методики интеграции наноструктур с микросистемами с использованием прошлого и текущего опыта. Охвачены различные проблемы синтеза и сборки одномерных наноструктур и гетерогенной интеграции с использованием MEMS как базовых блоков, включая синтез и сборку углеродных нанотрубок, кремниевых нанопроволок и нанопроволок из оксида цинка. Одной из инноваций в данных проектах является использование локализованного нагрева и синтеза таким образом, что наноструктуры могут выращиваться в камере при комнатной температуре. Продемонстрированы синтез, направленное выращивание и самосборка одномерных наноструктур посредством локализованных резистивного и индуктивного нагрева: процессы самосборки с мониторингом по месту в локальном направленном электрическом поле. В настоящее время выполняются программы исследований в следующих областях: интегральные наноэлектромеханические системы с использованием нанотрубок, нанопроволок и нановолокон. В заключение приведены направления будущих исследований.

2. **Совмещение технологии локальных транзисторов на углеродных нанотрубках с кремниевым затвором с технологией кремний на изоляторе.** Впервые реализована интеграция полевых транзисторов на углеродных нанотрубках (CNFETs) на кремниевой КМОП-платформе [M. Zhang, et al. *Novel Local Silicon-Gate Carbon Nanotube Transistors Combining Silicon-on-Insulator Technology for Integration // IEEE Transactions on Nanotechnology. V. 8. No. 2. March 2009*]. Были реализованы работа отдельного прибора, групповое изготовление, низкая паразитная емкость и

лучшая совместимость с КМОП-процессом. Характеристики CNFETs сравнимы с характеристиками современных приборов. Проанализированы эффект масштабирования, амбиполярная проводимость, влияние барьера Шоттки и искажения вольт-амперных характеристик. Выполнена также оценка физических характеристик CNTs.

3. **Адаптивные логические схемы на амбиполярных транзисторах без легирования с использованием углеродных нанотрубок.** КМОП-инвертер был интегрирован с использованием амбиполярных транзисторов без легирования с использованием углеродных нанотрубок (CNT) [W.J. Yu, et al. *Adaptive Logic Circuits with Doping-Free Ambipolar Carbon Nanotube Transistors. Nano Letters. 2009. 9(4). P. 1401 – 1405*]. Амбиполярные CNT-транзисторы автоматически конфигурируются, выполняя функции транзистора *n*-типа или *p*-типа в логической схеме в зависимости от прикладываемого напряжения и земли. Вентиль NOR (NAND) был адаптивно конвертирован в вентиль NAND (NOR). Это позволяет реализовать две логических функции в одной логической схеме, что открывает новые возможности для конструирования логических схем с высокой степенью интеграции для перспективных применений.

### Конструирование

1. **Высоконадежные транзисторы на углеродных нанотрубках с сформированными рисунками затворов и молекулярным затворным диэлектриком.** Реализация наноразмерных транзисторов, в которых используются отдельные полупроводниковые углеродные нанотрубки, имеет значительный потенциал в плане как альтернативы кремниевой технологии вне пределов обычного масштабирования, так и средства реализации быстродействующих приборов и схем на гибких подложках [R.T. Weitz, et al. *Highly Reliable Carbon Nanotube Transistors with Patterned Gates and Molecular Gate Dielectric. Nano Letters. 2009. 9(4). P. 1335-1340*]. Значительную проблему представляет реализация низковольтных нанотрубчатых транзисторов с индивидуально адресуемыми затворными электродами, от которых зависит большая крутизна характеристики прямой передачи, крутой допороговый перепад напряжения и большое значение отношения on/off. В данной работе было продемонстрировано, что эти важные цели могут быть достигнуты с помощью приборной структуры с нижним затвором, в которой совмещаются металлические затворы с сформирован-

ным рисунком с тонким слоем затворного диэлектрика на основе молекулярного самособираемого монослоя. Полученные транзисторы работают на напряжении затвор – исток 1 В и имеют крутизну  $5 \mu\text{S}$ , допороговый перепад 68 мВ/декада и отношение on/off 107. Установлено, что характеристики прибора не ухудшаются в течение 10000 циклов переключения и во время хранения в условиях окружающей среды в течение более, чем 300 дней. Продemonстрировано, что структура прибора позволяет изготовление униполярных логических схем с хорошими характеристиками переключения.

**2. Матрицы из углеродных нанотрубок на гибкой подложке и их характеристики полевой эмиссии.** В [T-H Chen, et al. Carbon nanotube arrays on flexible substrate and their field emission characteristics. *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. MEMS 2008. 13-17 Jan. 2008. P. 697-700*] приведено описание процесса серийного изготовления углеродных нанотрубок на гибкой подложке. Предварительно изготовленные матрицы из углеродных нанотрубок сначала смешиваются с полимером, а затем переносятся на полимерную пленку с использованием химического осаждения парилена из паровой фазы. Таким образом, получаются матрицы из углеродных нанотрубок на гибкой подложке. Электрические измерения выявили, что матрицы нанотрубок ведут себя, как омические проводники, а их вольт-амперная характеристика является линейной. Нанотрубки, внедренные в полимер, были подвергнуты плазменному  $\text{O}_2$  травлению. Выполненные измерения выявили у обработанных матриц нанотрубок низкопороговую полевую эмиссию при 0,58 В/мкм, и фактор усиления поля составил 5500. Таким образом, рассматриваемые структуры использованы для создания гибких приборов с полевой эмиссией.

### Готовые функциональные устройства

#### MEMS-приборы

**1. Практическое применение MEMS с учетом корпусирования.** В [Esashi M. *MEMS for practical application with attention to packaging. International Conference on Microsystems, Packaging, Assembly. Oct. 2006. P. 1-4*] выполнено исследование применений различных MEMS с учетом корпусирования. Были разработаны интегрированный емкостной датчик давления, реле, гироскоп, многозондовое устройство хранения данных, многоколончатая система для электронно-лучевой литографии с размещением в корпусе по уровню пластины. В этих кор-

пусах важную роль играет выполнение электрических вводов в стекле. Для реализации записывающих зондов был использован алмаз. Для выполнения функций электронного полевого эмиттера MEMS были использованы углеродные нанотрубки.

**2. Однокристалльные MEMS-двухполюсные коммутационные матрицы для телекоммуникационных сетей.** В [S. Braun, et al. *Single-chip MEMS 5 x 5 and 20 x 20 double-pole single-throw switch arrays for automating telecommunication networks. Journal of Micromechanics and Microengineering. 18. 2008*] сообщается об однокристалльных MEMS-коммутационных матрицах ( $5 \times 5$  или  $20 \times 20$  двухполюсных переключателей), предназначенных для автоматизации главного коммутационного щита в телекоммуникационных сетях. Приборы обеспечивают межсоединения любых из 5 или 20 входных линий на любые 5 или 20 выходных линий. Работа переключателей базируется на электростатическом S-образном актуаторе с контактом на гибкой мембране с перемещением между верхним и нижним электродами. Цепь маршрутизации на кристалле состоит из толстых металлических линий и встраивается в ВСВ-полимерные слои. Корпусированные коммутационные матрицы  $5 \times 5$  имеют размеры  $6,7 \times 6,4 \text{ мм}^2$ , а коммутационные матрицы  $20 \times 20$  имеют размеры  $14 \times 10 \text{ мм}^2$ . Напряжения срабатывания (закрытия/открытия) составляют в среднем 21,2В/15,3 В для матрицы  $5 \times 5$  и 93,2В/37,3В для матрицы  $20 \times 20$  соответственно. Общие значения сопротивления сигнальной шины меняются в зависимости от положения коммутатора в пределах матрицы и составляют между 0,13 и 0,56 Ом для матрицы  $5 \times 5$  и между 0,08 и 2,33 Ом для матрицы  $20 \times 20$  соответственно. Среднее сопротивление коммутационных контактов составляет 0,22 Ом со стандартным отклонением 0,05 Ом.

### Устройства на кремневой и гетероструктурной нанопроволоках

**Высокочастотный одноэлектронный транзистор на основе гетероструктурной нанопроволоки InAs/InP.** В [H.A. Nilsson, et al. *A Radio Frequency Single-Electron Transistor Based on an In-As/InP Heterostructure Nanowire. Nano Letters. 2008. V.8. No.3. P. 872-875*] продемонстрированы высокочастотные одноэлектронные транзисторы, изготовленные из InAs/InP гетероструктурных нанопроволок, полученных методом эпитаксиального наращивания. Были выращены два комплекта

проволок с двойным барьером с различными значениями толщины барьеров. Проволоки были подвешены на высоте 15 нм над металлическим затворным электродом. Электрические измерения нанопроволок с высоким сопротивлением показали периодические регулярные кулоновские колебания при затворном напряжении от 0,5 до, по меньшей мере, 1,8 В.

### Устройства – интегральные схемы

1. **1-ГГц интегральная схема с использованием межсоединений из углеродных нанотрубок и кремниевых транзисторов.** Ввиду превосходных электрических свойств металлические углеродные нанотрубки представляются перспективным материалом для реализации межсоединений будущих интегральных схем [G.F. Close, et al. *A 1 GHz Integrated Circuit with Carbon Nanotube Interconnect and Silicon Transistors. Nano Letters. 2008. 8(2). P. 706-709*]. Результаты моделирования показали, что использование межсоединений из металлических углеродных нанотрубок позволит создавать более эффективные по потребляемой мощности и более быстродействующие ИС. Следующим этапом является создание экспериментального образца с указанной структурой, работающего с высоким быстродействием. Сообщается о создании одиночного образца ИС, в которой совмещаются кремниевые транзисторы и отдельные межсоединения на основе углеродных нанотрубок на одном кристалле, работающей на частоте, превышающей 1 ГГц. Этот образец будет также использован как инструмент для исследования углеродных нанотрубок на кремниевых платформах для работы на высоких частотах, прокладывая путь к будущей многогигагерцевой радиоэлектронике.

2. **Синхронизирующие наносхемы для нанокomпьютеров и других нанoeлектронных систем.** Границы предполагаемых характеристик определяются имитационным моделированием класса всех нанoeлектронных синхронизирующих схем [D. Shamik, et al. *Clocking nanocircuits for nanocomputer and other nanoelectronic systems. IEEE International Symposium on Nanoscale Architectures, 21-22 Oct. 2007. P. 123 – 128*]. Такие схемы могут быть использованы в качестве главных генераторов синхронимпульсов на кристалле для автономных наносистем, локальных генераторов синхронимпульсов в составе нанoeлектронных комьютеров или локальных генераторов нанoeлектронных устройств для обработки смешанного сигнала. Представлены результаты конструирования и мо-

делирования указанных наносхем, которые предназначаются для изготовления уже имеющихся в распоряжении нанотехнологии наноприборов. С использованием таких синхронизирующих схем могут быть достигнуты рабочие частоты приблизительно до 1 ГГц для аналоговых применений и 150 МГц для цифровых нанoeлектронных систем.

### Нанoeлектроника в радиоэлектронных системах

#### Устройства для космических систем

1. **Реконфигурируемая антенна на базе MEMS для усовершенствованных глобальных навигационных спутниковых систем.** Реконфигурируемая антенна сконструирована и контролируется таким образом, что качество получаемого сигнала оптимизируется [L. Petit, J. Ayadi. *MEMS-based reconfigurable antenna for enhanced GNSS localization. 3rd International Conference on Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era. 25-27 March 2008. P. 1-6*]. В антенне используется отдельно корпусированный ВЧ MEMS-переключатель для того, чтобы реализовать разнообразие рисунка как поляризации, так и излучения. Вклад такой концепции распространяется от использования одного приемопередатчика в системе до систем с многочисленными входами и многочисленными выходами (MIMO).

2. **Усиление защиты спутников с использованием нанотехнологии.** В статьях [(1) J. Huntington. *Improving Satellite Protection with Nanotechnology. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?&verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA474825>; (2) Shields up! How nanotechnology can protect satellites from energy weapon. [www.nanowerk.com/spotlight/spotid=8308.php](http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=8308.php)], опубликованных в Центре стратегии и технологии ВВС США, исследуется угроза для спутников, вызванная оружием направленной энергии земного базирования, а также состояние исследований и разработок в области нанотехнологии, направленных на ослабление этой угрозы. Особое внимание уделяется лазерному и высокомогущному СВЧ-излучениям с точки зрения воздействия на спутники. Лазеры наземного базирования могут повредить тепловой контроль, структурные компоненты и компоненты системы питания. Лазеры генерируют и фокусируют интенсивные лучи света, который может войти в контакт с целью с большого расстояния. Маломощные лазеры обычно предназначены для введения в заблуждение или для подавления спутниковых электроопти-*



ческих датчиков, вызывая временное ослепление спутника. Высокомощные лазеры могут вызывать повреждение или разрушение перегретых частей спутника. Наиболее чувствительными являются структура спутника, система теплового контроля и солнечные панели.

Высокомощные СВЧ-системы наземного базирования дальнего действия в некоторых случаях могут быть использованы в качестве противоспутникового оружия. Интенсивное СВЧ-излучение от высокомоощного источника может вывести из строя или разрушить чувствительные электронные компоненты. В высокомоощном излучении используются мягкие механизмы для повреждения спутников, а не жесткие механизмы такие, как расплавление или разрушение. Мягкий механизм повреждения может иметь место в двух вариантах: внутри полосное повреждение и внеполосное повреждение. СВЧ-излучение на частоте антенны достигает ее и повреждает внутренние схемы за счет их перегрузки.

Обсуждается роль орбиты в степени уязвимости спутника. Рассматриваются также подсистемы спутника общего назначения и рассматривается оружие направленной энергии, которое может повредить указанные подсистемы.

Приведено несколько решений использования нанотехнологии для ослабления воздействия оружия направленной энергии:

- покрытия для упрочнения поверхности космического корабля для обеспечения лучшего противостояния тепловому и электромагнитному воздействиям. Наноструктурированное поверхностное покрытие будет отражать, абсорбировать, передавать падающую энергию, или выполнять комбинацию из указанных трех процессов;

- защиту также может обеспечить диспергирование. Лаборатория ВВС США в настоящее время управляет исследовательской программой, в которой для электромагнитного экранирования и усиления горизонтальной теплопроводности используются мембраны на углеродных нанотрубках;

- матрицы вертикально совмещенных углеродных нанотрубок исследуются на предмет использования в качестве теплоотводов компьютерных схем;

- пока чисто теоретически рассматривается вопрос создания «леса» из углеродных нанотрубок, который при небольшом напряжении и низком давлении будет излучать электроны, которые ионизируют атмосферу, генерируя плазменный экран вокруг структуры. Если случайная электро-

магнитная энергия имеет короткую длительность, то плазма погасит большую часть энергии;

- Лаборатория ВВС совместно с университетом Дэйтона осуществляет разработку метода управления теплопроводностью полимерных материалов, используемых для изготовления как промышленных, так и военных авиакосмических компонентов. В рамках проекта практически любой полимер преобразуется в многофункциональный материал, способный нести и рассеивать значительный электрический заряд. Специально сконструированные нанотрубки (диаметром от 50 до 150 нм) с токовыми несущими возможностями меди, но при гораздо меньшей плотности, тщательно рассредотачивались в полимерной матрице, приводя к созданию электропроводящих полимерных композитов.

Рассматриваются различия наноматериалов, полученных из материалов с микро- и макро-размерами. Приводятся подробные характеристики различных материалов. Поясняется, каким образом исследования и разработки в области нанотехнологии могут быть использованы для спутниковых подсистем. Например, поверхностные покрытия могут быть использованы для улучшения теплового контроля и электропроводности спутника, а наноматериалы – для улучшения радиационной стойкости спутниковых микропроцессоров и других структур.

**3. Успешные испытания нанодатчиков на орбите.** Устройство из системы химических нанодатчиков Nano ChemSensor как полезная нагрузка спутника MidSTAR-1 Академии ВМС США 9 Марта 2007 г. [*NASA Nanotechnology Space Sensor Test Successful in Orbit. [www.sciencedaily.com/releases/2007/06/070619105707.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2007/06/070619105707.htm)*]. Целью эксперимента было убедиться, что нанодатчики, изготовленные из углеродных нанотрубок, покрытые чувствительными материалами, могут быть использованы в условиях космического полета и выдерживать микрогравитацию, нагрев и космическую радиацию. Для каждого химического вещества был использован специальный чувствительный материал. Когда проверяемое химическое вещество касается чувствительного (считывающего) материала, это вызывает химическую реакцию, вызывающую увеличение или уменьшение электрического тока, протекающего через датчик. Для выполнения тестирования в космосе в небольшую камеру был введен азот, содержащий диоксид азота в объеме 20 частей на миллион. В камере также был расположен тестовый кристалл с 32 нанодат-

чиками. При тестировании осуществлялось изменение электрического тока, проходящего через датчик после контакта диоксида азота и считывающих материалов. Разработаны химические датчики с использованием углеродных нанотрубок и других наноструктур для обнаружения аммиака, диоксида азота, перекиси водорода, углеводорода, летучих органических соединений и других газов.

**4. Разработка электронных приборов на базе углеродных нанотрубок для космической аппаратуры.** В настоящее время в Центре космических полетов Goddard Space Flight Center реализуется программа по разработке и интеграции в научные приборы различных наноразмерных компонентов. В частности, ведется разработка магнетометра следующего поколения на базе использования электромеханических свойств углеродных нанотрубок и электронного устройства с холодным катодом для интеграции в миниатюрный бортовой масс-спектрометр [S.A. Getty, et al. Carbon nanotube-based electronic device for spaceflight instruments. SPIE Defense & Security Symposium. 6556-38, Session 8. 9-13 April. 2007]. Представлено описание процессов выращивания, изготовления и использования углеродных нанотрубок.

#### Устройства для радиолокационных систем и систем связи

**1. Формирователь диаграммы направленности РЛС на базе MEMS.** В [Ah. Sinjari, et al. MEMS automotive collision avoidance radar beamformer // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 18-21 May 2008. P. 2086-2989] представлена конструкция линзового формирователя диаграммы направленности Ротмана на базе MEMS, в котором используется толстая PZT пленка с высокой диэлектрической постоянной внутри линзовой полости. Линза Ротмана толщиной 56 мкм имеет площадь  $5,5 \times 7,1$  мм<sup>2</sup>, включает три лучевых порта, пять матричных портов и работает на частоте 77 ГГц. Линза имеет усиление главного лепестка 35 дБ при угле сканирования в 4°. Малые размеры формирователя позволяют его размещать вертикально или горизонтально, реализуя компактную РЛС на базе MEMS в сочетании с микрополосковыми антеннами и необходимыми микросхемами. Устройство может быть использовано в системе исключения столкновений автомобиля для установления близости других автомобилей или препятствий.

**2. Использование MEMS переключателя для управления антенной РЛС.** Фирма Radant

Technologies впервые продемонстрировала легкую антенну с электронным сканированием (ESA) с использованием MEMS-переключателя, связанную по контракту с ВВС США [MEMS switches steer radar antenna for AFRL. Military Electronics, June 2006]. Антенна была использована для бортового и поверхностного обнаружения цели при работе с существующей РЛС, работающей в X-диапазоне. Для первой демонстрации MEMS РЛС была изготовлена фирмой Lockheed Martin, где стандартная антенна с механическим сканированием РЛС AN/APG-67 была заменена ESA фирмы Radant, включающей 25000 MEMS-приборов. ESA была подсоединена к существующим передатчику, приемнику и дисплею. Электронное сканирование осуществлялось в секторе 120° в полосе пропускания 1 ГГц диапазона X под контролем РЛС AN/APG-67. Электронный интерфейс был обеспечен фирмой DRS Laurel Technologies. Детектирование движущейся цели было выполнено на малом самолете, а детектирование наземной движущейся цели – на наземном транспорте. Показана возможность реализации больших антенн площадью, превышающей 8 м<sup>2</sup> (в данном случае площадь составляла 0,4 м<sup>2</sup>).

**3. ВЧ MEMS коммутатор бесконтактного типа для 24 ГГц РЛС.** В статье [J. Park, et al. A Non-Contact-Type RF MEMS Switch for 24-GHz Radar Application. Journal of Micromechanical Systems, Feb. 2009. P. 163-173] излагаются вопросы конструирования, изготовления и приводятся результаты нового ВЧ MEMS-коммутатора бесконтактного типа для 24-ГГц РЛС. Разработанное устройство представляет собой емкостный коммутатор шунтирующего типа, в котором используется изменение емкости между сигнальной шиной и шиной заземления. Емкость точно регулируется гребенчатыми актуаторами. Данная концепция проста, но требует большого и прецизионного перемещения. Кроме того, в конструкции требуется воздушная перемычка с большим воздушным зазором, поэтому для изготовления коммутатора был использован объемный микромеханический процесс с жертвенным слоем на основе селективного технологического процесса кремний на изоляторе. Сначала под поверхностью пластины были изготовлены большие изолированные опоры, на которых затем были изготовлены ВЧ-коммутаторы. Измеренное рабочее напряжение составило 25 В. Время переключения из состояния «выключено» в состояние «включено» составило 8 мс. При снятии ВЧ-характеристик вносимые потери составили 0,29 дБ без учета потерь в длинной

компланарной волноводной магистрали, а изоляция составила 30,1 дБ при 24 ГГц.

**4. Проект по созданию интегрального устройства на базе алмазной MEMS и КМОП-прибора для использования в РЛС и системах мобильной связи.** Аргоннская национальная лаборатория Министерства энергетики США получила финансирование в сумме 1,4 млн. долларов от Агентства перспективных исследований в интересах МО (DARPA) на выполнение третьей фазы исследовательского проекта по созданию интегрального устройства на базе алмазной MEMS и КМОП-прибора для применения в РЛС и системах мобильной связи с использованием разработанной в лаборатории и запатентованной технологии получения ультрананокристаллических алмазных пленок (UNCD) [DARPA funds Argonne project to develop MEMs and CMOS-based mobile communication technology. [www.smalltimes.com/articles/artucle\\_display.cfm?ARTICLE\\_ID=332436](http://www.smalltimes.com/articles/artucle_display.cfm?ARTICLE_ID=332436)]. Интеграция емкостных ВЧ MEMS- и КМОП-приборов обеспечит быстрое электронное сканирование радиолокационными лучами, обуславливая существенное улучшение быстродействия и точности РЛС. Монолитная интеграция ВЧ MEMS/КМОП-приборов значительно увеличит функциональные возможности современных беспроводных приборов. ВЧ MEMS-приборы (резонаторы, переключатели) позволяют значительно улучшить функциональные возможности и характеристики ВЧ- и СВЧ-систем. Соисполнителями по программе являются: Advanced Diamond Technologies, Inc; Innovative Micro Technology (IMT); MEMtronics Corp.; Peregrine Semiconductor, Пенсильванский университет, университет Ли (Leigh). Аргоннская лаборатория имеет опыт в освоении UNCD-технологии и работает совместно с академическими учреждениями и промышленными фирмами в области разработки новых MEMS-приборов на основе UNCD и других гибридных технологий, включая интеграцию оксидных пьезоэлектрических и UNCD-пленок, которая позволяет изготовить UNCD-резонаторы с пьезоэлектрическим возбуждением и нанопереключатели с наименьшей потребляемой мощностью.

**5. Радиоприемник на основе нанотрубки.** Сконструирован полностью функционирующий интегрированный радиоприемник на основе одной нанотрубки [K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, A. Zettl. Отдел физики, Центр интегральных наномеханических систем, Калифорнийский университет; Отд. материаловедения, Берклийская национальная лабо-

ратория Лоуренса. *Nanotube Radio*. *Nano Letters*, November 2007]. Нанотрубка одновременно выполняет функции всех основных компонентов радио: антенны, регулируемого полосового фильтра, усилителя и демодулятора. Реализовано батарейное питание радио. Был осуществлен успешный прием музыки и голоса с использованием несущей волны промышленного частотного диапазона 40 – 400 МГц и техники частотной и амплитудной модуляции.

**6. Особенности применения новых MEMS-приборов.** MEMS-приборы на базе кремния имеют большие перспективы использования в мобильной технике. В статье [M. Tanaka. *An industrial an applied review of new MEMS features*. *Microelectronic Engineering*. V. 84. Issues 5-8, May-August. 2007. P. 1341-1344] рассматривается пример сенсорной сетевой системы. С технической и пользовательской точек зрения рассматривается влияние основных электромеханических свойств таких приборов, как Si-MEMS, кварцевых MEMS, а также пьезоэлектрических на общие характеристики системы. Приведено описание системы коррекции размытости изображений в цифровой камере или видеоустройстве, вызванной дрожанием руки. Кроме того, выполнено тестирование сенсорной навигационной системы. При коротком сроке работы все материалы датчиков имеют превосходные характеристики при использовании в камерах и видеоустройствах. Но при долгосрочной работе навигационных систем и систем наблюдения за подвижными объектами Si-MEMS-датчик может иметь большое смещения сигнала. Потребляемая мощность различных датчиков по входу сравнивалась с устройством связи.

Предложено, чтобы системный конструктор учитывал особенности каждой технологии и использовал MEMS-технику в случаях эффективного применения.

**7. Интегрированная система матриц микрокантилеверов с наконечниками углеродных нанотрубок для записи изображений, считывания и манипуляции 3D-элементов в нанодиапазоне.** В статье [E. Lee. *An integrated system of microcantilever arrays with carbon nanotube tips for imaging, sensing, and 3D nanomanipulation: design and control*. *Sensor and Actuators A: Physical*. 28 February 2007. V. 134. Issue 1. P. 286-295] представлены конструкция и контроль микрокантилеверных матриц с массовым параллелизмом с наконечниками от многостенных углеродных нанотрубок. Интегрированная система может стать мощ-

ным инструментом для формирования изображений, считывания, 3D-манипуляции наночастицами и биологическими образцами. Конструкция датчика обсуждается с использованием наконечников углеродных нанотрубок в качестве наноэлектродов. Для исследования динамического поведения была разработана распределенная модель параметров системы. Имитационное моделирование было выполнено на микроантилеверах трех различных размеров с наконечниками из нанотрубок.

**8. Использование микромеханических схем в ВЧ входных устройствах.** Достигнув достаточного уровня  $Q$ , тепловой стабильности, устойчивости против старения, технологичности ВЧ MEMS, начинают находить применение в следующем поколении беспроводных устройств и устройств синхронизации [Nguyen, C.T.-C. *Integrated micromechanical circuits for RF front ends. Proceedings of the 32nd European Solid-State Circuit Conference, ESSCIRC 2006. Sept. 2006. P. 7-16*]. ВЧ MEMS-схемы по мере увеличения сложности становятся схемными базовыми блоками. В статье рассматривается современное состояние технологии создания колебательных ВЧ MEMS-устройств, описываются особенности механических схемных элементов, позволяющие расширить функциональные возможности будущих интегральных микромеханических схем.

**9. Интеграция кремниевых наноприборов и NEMS для обработки информации с повышенной скоростью.** В статье [H. Mizuta, et al. *Cointegration of silicon nanodevices and NEMS for advanced information processing. 9th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. 20-23 Oct. 2008. P. 2375-2378*] представлены последние попытки реализации приборов с повышенной скоростью обработки информации посредством интеграции наноэлектромеханических структур (NEMS) в обычные кремниевые приборы. Во первых, продемонстрированы высокое быстродействие и энергонезависимая NEM-память, которая характеризуется механически – бистабильным плавающим затвором, интегрированным в МОП-полевой транзистор. Во вторых, обсуждаются гибридные системы из одноэлектронных транзисторов и NEM-структур для исследования новых принципов переключения.

### Устройства для ЭВМ

**1. Создание сверхбыстродействующих ЗУ с использованием телескопических нанотрубок.** В настоящее время флэш-память является наиболее

распространенной разновидностью энергонезависимых ОЗУ, нашедшей применение в разнообразных бытовых электронных устройствах таких, как платы памяти, цифровые музыкальные плееры, цифровые камеры, сотовые телефоны [[www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1449.php](http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1449.php)]. Одна из проблем, связанная с флэш-памятью, заключается в относительно невысоком быстродействии. Исследователи приступили к конструированию базовых блоков данного вида памяти с использованием телескопических углеродных нанотрубок, выступающих в качестве быстродействующих маломощных микропереключателей. Ведутся работы по созданию генераторов частот в гигагерцевом диапазоне на углеродных нанотрубках (CNTs). Были выделены внутренние CNTs из многостенных CNT (MWCNT) посредством электростатических сил и реализованы нанотрубчатые линейные сервомоторы с использованием межслойного движения телескопических MWCNTs. На этой основе исследователи приступили к разработке концептуальной конструкции макроскопически адресуемого устройства для хранения данных, в котором могут быть совмещены свойство энергонезависимости и терабитная емкость.

Главным структурным элементом такой нанопамяти является MWCNT, осажденная на металлический электрод. Кромки металлического электрода и CNT размерами в несколько нанометров очищаются посредством травления. Рассматриваемая нанопамять базируется на телескопическом движении MWCNTs относительно друг друга. Подвижная сердцевинная нанотрубка может скользить внутри неподвижной нанотрубки посредством изменения электростатических сил. Это «телескоп» располагается между двумя электродами, которые являются нейтральными в состоянии покоя. При отрицательной зарядке одного из электродов и положительной зарядке сердцевинной нанотрубки, нанотрубка может преодолеть силы притяжения, удерживающие вместе внутренние и внешние трубки, и перемещается в направлении противоположно заряженному электроду. С другой стороны, положительно заряженный другой электрод и отрицательный заряд сердцевинной трубки позволяют нанотрубке перемещаться в другом направлении. Высокий уровень демпфирования обеспечивает возврат сердцевинной нанотрубки обратно в центральное положение. Перспективы создания таких процессоров молекулярного масштаба привлекают такие корпорации, как Hewlett-Packard, IBM, Motorola, Siemens,



Hitachi. Предполагается, что через два – три года будет создан образец молекулярного процессора.

2. **Быстродействующая память на базе полевых транзисторов на углеродных нанотрубках.** В [R. Marcus, et al. *High-Speed Memory from Carbon Nanotube Field-Effect Transistors with High Dielectric. Nano Letters. 2009 (2). P. 643-647*] продемонстрирована 100-нс скорость записи/стирания на элементах памяти на базе полевых транзисторов на одностенных углеродных нанотрубках (SWCNT-FET). При таком быстродействии указанные элементы памяти могут конкурировать по этому показателю с современной промышленной флэш-памятью. Показано, что срок службы этих элементов памяти превышает 10<sup>4</sup> циклов. Структура SWCNT-FET имеет атомный слой осажденного оксида гафния как затворного диэлектрика и приборы пассивируются другим слоем оксида гафния для уменьшения поверхностных химических воздействий. Обсуждается модель, где оксид гафния имеет дефектные состояния, расположенные над, но близко к запрещенной энергетической зоне SWCNT. Факт быстрой и эффективной зарядки и разрядки указанных дефектов, очевидно, является объяснением наблюдаемого 100-нс быстродействия, что значительно превышает 10-мс быстродействие SWCNT-FET-памяти, наблюдаемое ранее в приборах с обычными затворными оксидами.

3. **Разработка ЗУ на углеродных нанотрубках.** Ученые из Хельсинского университета (Финляндия) создали новый тип ЗУ, основанный на углеродных нанотрубках, который по быстродействию сравним с ЗУ, используемым на платах памяти [Carbon-Nanotube Memory that Really Competes. [www.physorg.com/print152202897.html](http://www.physorg.com/print152202897.html)]. Схема памяти реализуется из полевых транзисторов на основе одностенных углеродных нанотрубок. Каждый транзистор состоит из четырех основных элементов: затвора, истока, стока и подложки. В качестве подложки была использована кремниевая пластина. На оборудовании финской компании Beneq Oy было выполнено осаждение слоя диоксида гафния толщиной 20 нм. Этот слой изолирует подложку, которая используется также в качестве затвора. Выбор диоксида гафния в качестве затворного диэлектрического материала, расположенного между двумя проводниками, представляется ключевым моментом для обеспечения быстродействия прибора, так как это позволяет захватывать и освобождать заряд очень быстро и эффективно. Далее на поверхность слоя диоксида

гафния наносят несколько капель раствора, содержащего выпускаемые промышленностью углеродные нанотрубки диаметром 1,2 – 1,5 нм и длиной от 100 до 360 нм. С использованием атомно-силового микроскопа нанотрубки идентифицируются с соответствующим совмещением и только такие нанотрубки становятся транзисторами. Затем для каждой нанотрубки создают электроды истока и стока, используя металл палладий с формированием проводящего канала транзистора. Наконец, на поверхность нанотрубчатого транзистора наносят другой 20-нм слой диоксида гафния для пассивации поверхности, предохраняя от нежелательных реакций. Каждый транзистор сохраняет информацию о протекании через него тока. Состояние транзистора при протекании тока может представлять «1», а состояние транзистора при отсутствии тока может представлять «0». Каждый транзистор может хранить информацию в течение 150000 с, или около 42 ч. Это немного, поэтому намечено усовершенствование, заключающееся в добавлении оксидного слоя между затвором и нанотрубкой. Следует отметить, что могут быть использованы другие углеродные материалы, например, пучки углеродных нанотрубок и графены.

4. **Наноразмерная система межсоединений для наноразмерных микропроцессоров.** Быстрый прогресс технологии изготовления наноразмерных приборов вынуждает специалистов исследовать соответствующие наноразмерные компьютерные архитектуры с плотностью упаковки, выходящей за физические ограничения обычной литографии [Teng et al. *NASICs: A nanoscale fabric for nanoscale microprocessors. 2nd IEEE International Nanoelectronics Conference, 24-27 March. 2008. P. 989 – 994*]. Однако по причине ограничений технологии и топологии, а также высокой плотности дефектов, ожидаемой в наноразмерной системе межсоединений, намеченная плотность приборов может оказаться невозможной при интеграции в вычислительную систему. Поэтому желательна наноразмерная архитектура, которая позволит сохранить преимущества плотной упаковки. В статье приводится описание новой наноразмерной архитектуры, основанной на полупроводниковых нанопроволоках: NASICs (Nanoscale Application Specific ICs – наноразмерные специализированные ИС). NASIC представляет собой структуру межсоединений, построенную на 2D-нанопроволочной сети и нанопроволочных полевых транзисторах. Изготовлен процессор WISP-0 (Wire Streaming Processor), в

конструкции которого были использованы принципы и оптимизация NASIC, в которой также была использована техника поддержания отказоустойчивости. Оценка показала, что плотность WISP-0 в 2-3 раза выше плотности аналогичного КМОП-процессора, изготовленного с использованием 18 нм технологии, ожидаемой в 2018 г.

### Другое практическое применение

#### 1. Создание первого цветного электрофоретического дисплея на основе углеродных нанотрубок.

Фирма Samsung впервые в мире продемонстрировала черно-белый электрофоретический 2,3-дюймовый дисплей на основе углеродных нанотрубок [Unidym Announces a Demonstration by Samsung Electronics of the First Color Carbon Nanotube-Based Electrophoretic Display. *Business Wire, October 16, 2008*]. На международной конференции по информационным дисплеям (Корея, 13-17 октября 2008 г.) был продемонстрирован первый цветной крупномасштабный электрофоретический дисплей формата 14,3" (электронной бумаги) на основе использования прозрачных электродов из углеродных нанотрубок. Создание дисплея стало результатом совместной работы фирм Unidym, Inc. (филиал Atowhead Research Corporation) и Samsung Electronics. Это достижение стало возможным благодаря непрерывному совершенствованию важных свойств пленок из углеродных нанотрубок фирмой Unidym, которая является лидером в изготовлении и применении углеродных нанотрубок. Новый дисплей обладает несомненными преимуществами перед плоскими дисплеями в плане потребляемой мощности и яркости, что делает их пригодными для использования в портативных и мобильных устройствах. Так как дисплей может быть изготовлен на тонкой гибкой подложке, он идеально подходит для использования в качестве электронной бумаги. В отличие от обычных плоских дисплеев новый дисплей работает на отраженном свете, может сохранять текст или изображения без необходимости постоянной регенерации при резком уменьшении потребляемой мощности.

2. **Практическое применение MEMS с учетом корпусирования.** В [Esashi M. *MEMS for practical application with attention to packaging. International Conference on Microsystems, Packaging, Assembly, Oct. 2006. P. 1-4*] исследованы применения различных MEMS с учетом корпусирования. Были разработаны интегрированный емкостный датчик давления, реле, гироскоп, многозондовое устройство хранения данных, многоколончатая система

для электронно-лучевой литографии с размещением в корпусе по уровню пластины. В этих корпусах важную роль играет выполнение электрических вводов в стекле. Для реализации записывающих зондов был использован алмаз, для выполнения функций электронного полевого эмиттера MEMS были использованы углеродные нанотрубки.

### Заключение

Итак, освещены некоторые вопросы в области исследований микро- и наноэлектроники в части особенностей развития углеродных нанотрубок как структуры новых материалов в радиофизике применительно к системам радиолокации и радиосвязи.

Рассмотрены области применения материалов и структур в микро-и наноэлектронике, а также в технологии производства новых наноматериалов и устройств в качестве рабочих элементов (структур). Проведен анализ особенностей развития углеродных нанотрубок как структуры новых материалов в радиофизике.

Предложены варианты формулирования предполагаемых проблем и направлений в постановке научных работ в области наноэлектроники применительно к системам радиолокации и радиосвязи на ближайшую перспективу.

На основе анализа иностранных публикаций приведены сведения о состоянии и развитии углеродных нанотрубок на 2006-2009 годы за рубежом.

### Литература

1. Алфимов М.В. Вступительное слово // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5. № 5-6.
2. Каложный С.В., Разумовский А.С. Что такое «нанотехнологии»? // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5. № 5-6.
3. Гуляев Ю.В., Косаковская З.Я., Мухатов А.Л., Симицын Н.И. Углеродные нанотрубные структуры – новый материал для эмиссионной электроники // Радиотехника. 2003. № 8. С. 36-41.
4. Гуляев Ю.В., Симицын Н.И., Торгашов Г.В., Жбанов А.И., Торгашов И.Г., Савельев С.Г. Автоэлектронная эмиссия с углеродных нанотрубных и нанокластерных пленок // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 11. С. 1399-1406.
5. Гуляев Ю.В., Глухова О.Е., Жбанов А.И., Симицын Н.И., Торгашов Г.В. Электроника углеродных трубок // Вопросы прикладной физики: межвуз. науч. сб. Приложение к журналу «Радиотехника и электроника». 2005. Т. 46. № 5. С. 514-520.
6. Лисенков И.В., Никитов С.А., Попов Р.С., Чуя Ку Ким. Нано- и микросистемная техника // Радиотехника и электроника. 2007. № 52. С. 1122 – 1134.
7. Гуляев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф., Нефедов И.С., Симицын Н.И., Торгашов Г.В. Технология выращивания углеродных нанотрубных пленок методом пиролиза углеводородов в высокочастотной плазме // Планарные за-

- медляющие системы. URL: [www.nanometer.ru/2007/12/08/11971217137904.html](http://www.nanometer.ru/2007/12/08/11971217137904.html).
8. Институт радиотехники и электроники Российской Академии наук (к 50-летию со дня образования) // Радиотехника. 2003. № 8. С. 4 – 14.
  9. Глазьев С.Ю., Дементьев В.Е., Елкин С.В., Крянев А.В., Ростовский Н.С., Фирстов Ю.Л., Харитонов В.В. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике / под ред. акад. РАН С.Ю. Глазьева и проф. В.В. Харитонова. М.: Тривант. 2009.
  10. Жувикин Г. Спинтроника // Компьютерра. 2005. № 3. URL: <http://offline.computerra.ru/2005/57/5/37385>.
  11. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Эпштейн Э.М. Как ток спины переносит. Спинтроника многослойных ферромагнетиков // Природа. 2007. № 5.
  12. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И., Эпштейн Э.М. Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности тока // УФН. Т. 179. № 4. 2007.
  13. Альтман Ю. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений. М.: Техносфера. 2008.
  14. Федотов А., Агабеков Ю., Мачикин В. Многофункциональные наноконструктивные покрытия / Наноиндустрия. 2008. № 1. С. 24 – 26.
  15. Гуляев Ю.В. Гетероструктурные приборы // Письма в ЖТЭФ. 2003. Т. 77. Вып. 10. С. 670 – 674.
  16. Силицын Н.И., Гуляев Ю.В., Девятков Н.Д. и др. Возможности вакуумной микроразработки на пути к построению СВЧ-вакуумных интегральных схем // Радиотехника. 1999. № 4.
  17. Chernozatonskii L.A. A New Nonfullerene Form of C<sub>60</sub> and its Doped Metal Solids // Phys. Lett. 1991. V. A 160.
  18. Chernozatonskii L.A. Barrelenes/tubelenes – a New Class of Cage Carbon Molecules and its Solids // Phys. Lett. V. A 166. 1992.
  19. Косаковская З.Я., Чернозатонский П.А., Федоров Е.А. Нановолоконная углеродная структура // Письма в ЖЭУФ. 1992. Т. 56. Вып. 1.
  20. Iijima S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon // Nature. 1991. V. 354.
  21. Ebbesell, N W., Ajayan, P.M. Large-Scale Synthesis of Carbon Nanotubes // Nature. 1992. V. 558.
  22. Iijima, S., Ichihashi, T. Single-Shell Carbon Nanotubes of 1nm Diameter // Nature. 1993. V. 363.
  23. Saito, R., Fujita, M., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M.S. Electronic Structure of Graphene Tubules Based on C<sub>60</sub> // Phys. Rev. D. 1992. V. 46.
  24. Mintimze, J. W., Dunlap, B.I., White, C. T. Are Fullerene Tubules Metallic? // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68.
  25. Hamada, N., Sawada, S., Oshiyama, A. New One-Dimensional Conductors-Graphitic Microtubules // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68.
  26. Nanotube '99/ International Workshop on the Science and Application of Nanotubes. USA. East Lansing, Michigan. 1999. 24-27 July.
  27. Gulyaev, Yu.V., Chernozatonskii, L.A., Kosakovskaya, Z. Ya., et al. Field Emitter Arrays on Nanofilament Carbon Structure Films // Revue «Le Vide, Les Couches Minces». No. 271. Mar/April 1994. Suppl.
  28. Sinityn, N.I., Gulyaev, Yu. V., Torgashov, G. V., et al. Thin Films Consisting of Carbon Nanotubes as a New Material for Emission Electronics. Documentation of International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC'96). Eindhoven, Netherlands. 1996. 1-4 July. Applied Surface Science. 1997. V. 3879. No. 111.
  29. Chernozatonskii, L.A., Kukovitskii, E.F., Musatov, A.L. et al. Carbon Crooked Nanotube Layers of Synthesis, Structure and Electron Emission // Carbon. 1998. V.36.
  30. Musatov, A.L., Kiselev, N.A., Zakharov, D.N., et al. Field Electron Emission from Nanotube Carbon Layers Grown by CVD Process // Appl. Surf. Sci. 2001. V. 183.
  31. Синицына О., Мешков Г., Пискунов Н., Фетисова О., Абрамчук С., Головань Л., Томишко А., Томишко М., Демичева О., Яминский И. Технологии производства новых материалов и устройств с углеродными нанотрубками в качестве рабочих элементов / Наноиндустрия. 2008. № 4.
  32. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения / под ред. П.П. Мальцева. М.: Техносфера. 2008.
  33. Елецкий А.В. Перспективы применений углеродных нанотрубок // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 5 – 6. С. 6 – 17.
  34. Фионов А., Яминский И. Обработка и анализ данных в сканирующей зондовой микроскопии: алгоритмы и методы // Наноиндустрия. 2007. № 2. С. 32 – 34.
  35. Елецкий А.В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 3. С. 233 – 274.
  36. Томишко М.М., Алексеев А.М., Клинова Л.Л., Томишко А.Г., Демичева О.В., Чмутин И.А. Зонды для сканирующих туннельных микроскопов на основе углеродных нанотрубок // Нанотехника. 2006. № 1. С. 15 – 17.
  37. Таусенев А.В., Образцова Е.Д., Лобач А.С., Чернов А.И., Конов В.И., Коняченко А.В., Крюков П.Г., Дианов Е.М. Самосинхронизация мод в эрбиевых волоконных лазерах с насыщающимися поглотителями в виде полимерных пленок, содержащих синтезированные методом дугового разряда одностенные углеродные нанотрубки // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 3. С. 205 – 208.
  38. Ильичев Н.Н., Образцова Е.Д., Пашинин П.П., Конов В.И., Гарнов С.В. Самосинхронизация мод с помощью пассивного затвора на основе одностенных углеродных нанотрубок в лазере на кристалле LiF: F2 // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 9. С. 785 – 786.
  39. Кулеманов И., Герасименко Н. Неорганические нанотрубки: синтез и свойства / Наноматериалы. 2008. № 5.
  40. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. Образование и рост углеродных наноструктур-фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов // УФН. 1997. Т. 167. № 7. С. 751.
  41. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки // УФН. 1997. Т.167. №9. С. 945.
  42. Ковальчук М.В. Органические наноматериалы, наноструктуры и нанодиагностика // Вестник РАН. 2003. Т.73. № 5. С. 405 – 411.
  43. Неволин В., Самунин М. Получение углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза этанола из газовой фазы // Наноиндустрия. 2007. № 3. С. 34 – 38.
  44. Принц В.Я., Селезнев В.А., Гутаковский А.К. Физика полупроводников. 1999. World scientific ISBN 981-02-4030-9 (CD).
  45. Принц В.Я., Селезнев В.А., Гутаковский А.К. и др. Physica E. 2000. V.6. № 1–4. P.828.
  46. Osadchii V.M., Prinz V.Ya. JETP Lett. 2000. V.72. P.312.
  47. Joshua Goldberger, Rongrui He, Yanfeng Zhang, Sangkwon Lee, Haoquan Yan, Heon-Jin Choi & Peidong Yang Single-crystal gallium nitride nanotubes // Letters to nature. Nature. 10 April 2003. V. 422. P. 599–602.

48. Zygmunt J., Krumeich F., Nesper R. Novel Silica Nanotubes with a High Aspect Ratio – Synthesis and Structural Characterization. *Adv. Mater.* 2003. V. 15.
49. Hong Jin fan, Mato Knez, Roland Scholz, Kornelius Nielsch, Eckhard Pippel Monocrystalline spinel nanotube fabrication based on the Kirkendall effect // *Nature Materials*. 2006. No. 5. P. 627 – 631 (doi:10.1038/nmat1673).
50. Днепровский В.С., Жуков Е.Л., Маркова Н.Ю., Муляров Е.Л., Черноуцан К.А., Шалыгина О.А. Оптические свойства экситонов в квантовых нитях полупроводник (InP)-диэлектрик // *Физика твердого тела*. 2000. Т. 42. Вып. 3.
51. Чернозатонский Л.А., Сорокин П.Б., Федоров А.С. Энергетические и электронные свойства неуглеродных нанотрубок на основе диоксида кремния // *ФТТ*. 2006. Т. 48. Вып. 10.
52. Гирин Б.М., Денисюк Р.Н., Мериакри В.В., Мурмушев Б.А., Пархоменко М.П., Солосин В.С., Фонгратовски С.В., Федосеев Н.А., Чигряй Е.Е., Чмутин И.А. Спектральные свойства композитов на основе углеродных нанотрубок и полипропилена в миллиметровом и сантиметровом диапазонах электромагнитных волн // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН. 26-30 октября 2009 г. С. 140 – 144.
53. Thomas A. Adams J.I. Physical Properties of Carbon Nanotubes. 2000. URL: <http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties/>.
54. Томишко М.М., Алексеев А.М., Томишко А.Г. и др. Углеродные нанотрубки основа материалов будущего // *Нанотехника*. 2004. № 1. С. 10–15.
55. Томишко М.М., Чмутин И.А., Демичева О.В., Шклярова Е.И. Электрические и магнитные свойства многостенных углеродных нанотрубок, полученных термokatалитическим методом // Четвертая Международная конференция «УГЛЕРОД: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». Москва. 26–28 октября 2005. Сб. трудов. М.: МГУ. 2005. С. 119.
56. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. № 2. С. 173–184.
57. Мериакри В.В., Пархоменко М.П., Чигряй Е.Е. Новые методы измерения комплексного коэффициента преломления сильно поглощающих материалов при одностороннем доступе // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2008. Т. 13. № 1. С. 58 – 60.
58. Amrhein E.M., Heil H. Dielectric absorption of polymers from the millimeter to the far infrared region // *J. Phys. Chem. Solids*. 1971. V. 32. No. 8. P. 1925 – 1933.
59. Jager K.-M., McQueen D.H. Thermal Stabilities of Electrical Properties of EVA/CB Composites // *Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 1999. V. 52. No. 11.
60. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. М.: Мир. 1971.
61. Раков Э.Г. О возможностях и перспективах применения производимых в России углеродных нанотрубок для решения задачи создания приборов нового поколения // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ РАН. 26 – 30 октября 2009. С. 131 – 132.

Поступила 21 июня 2010 г.

## Micro- and Nanoelectronics Relating to Radar and Radio Communication Systems

© Autors, 2010

R.P. Bystrov, Ju.V. Guluaev, S.A. Nikltov, A.V. Sokolov

Considering foreign and domestic sources, it is expected that rapid development of micro- and nanoelectronics will lead to revolutionary changes in creation of micro technical complexes of different applicability. All it essentially changes the character of basic classes of any activity. Huge potential get developing in nanotechnologies for their use in extremely high and various set of practical areas, beginning from manufacturing of strong and lightweight construction materials in mechanical engineering to higher time characteristics of nanostructured medicaments in blood system; for increase in memory size and speed of computers and in functional parts and devices of radio engineering and communication systems etc. Great attention, since the end of 80th, is given to researches in the field of development of carbon nanotubes as new materials for emission electronics in the V.A. Kotelnikov's Institute of radio engineering and electronics of RAS together with the Saratov branch of the Institute. Since the same years, researches of physical properties and applicability of nanotubes in micro- and nano-electronics are being fulfilled. In this paper, in a survey form, on materials of domestic and foreign sources some questions in the field of researches of micro- and nanoelectronics regarding features of development carbon nanopipes as perspective materials in radio physics with reference to radars and radio communication systems are treated. Variants of a formulation of prospective problems and directions directed by scientific works in area of nanoelectronics with reference to radars and radio communication systems are proposed. Also, on the basis of the analysis of foreign materials on development of carbon nanotubes, data on these works for 2006-2009 abroad are resulted.



## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

1. К публикации принимаются материалы, не предназначенные для публикации в других изданиях.
2. Статья должна содержать:
  - сопроводительное письмо;
  - акт экспертизы;
  - соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
  - название на *русском и английском языках*;
  - инициалы и фамилии авторов на *русском и английском языках*;
  - аннотацию на *русском и английском языках*;
  - ключевые слова на *русском и английском языках*;
  - краткое содержание статьи (реферат) на *русском и английском языках* объемом 1–2 с.**
  - текст статьи;
  - список литературы в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 – 2008;
  - краткие сведения об авторах, включающие **контактный телефон**, фамилию, имя, отчество (полностью), ученую степень (звание), место работы, **служебные** и домашние адреса авторов с обязательным указанием почтового индекса и **номеров телефонов**, **адрес электронной почты** (представляются на отдельной странице на русском и английском языках).
3. Статья представляется в виде файла формата *MS Word (\*.doc)* и **двух экземпляров распечатки в 1,5 интервала** между строками. Файл может быть записан на магнитном (FDD 3,5") и оптическом (CD, DVD) носителе. **Статья должна быть пронумерована сквозью.**
4. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты — *Times New Roman* и *Symbol*. Устанавливаемый размер бумаги — А4 210×297 мм. Формульные выражения выполняются только в “Редакторе формул” (*MathType* или *Equation Editor*).
5. Иллюстрации выполняются в графических редакторах в виде черно-белых графических файлов формата *\*.tiff* с разрешением 300×300 dpi, и представляют на отдельных листах в двух экземплярах (*только черно-белые*). Все иллюстрации сопровождаются **подписными подписями** (не повторяющими фразы-ссылки на рисунки в тексте), включающими в себя номер, название иллюстрации и при необходимости — условные обозначения. Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:
  - масштаб изображения — наиболее мелкий (при условии читаемости);
  - буквенные и цифровые обозначения на рисунках по начертанию и размеру должны соответствовать обозначениям в тексте статьи;
  - размер рисунка — не более 15×20 см, желательно в портретной ориентации;
  - текстовая информация и условные обозначения выносятся из рисунка в текст статьи или подписные подписи.Фотографии принимаются только в оригиналах. Иллюстрации могут быть включены в файл текста, но помимо этого они обязательно должны быть представлены отдельным файлом.
6. Термины и определения, единицы физических величин, употребляемые в статье, должны соответствовать действующим ГОСТ.
7. В формулах латинские буквы и греческие строчные следует набирать курсивом, а греческие прописные прямо. **Векторы и матрицы** следует набирать **прямыми жирным шрифтом**; «e» в значении экспоненты — **прямым светлым шрифтом**. В индексах сокращения от русских и английских слов следует набирать **прямым шрифтом**.
8. Формулы следует нумеровать в круглых скобках (например, (2)), литературные ссылки в прямых — [2], подстрочные замечания оформляются сноской (отмечаются звездочками \*).
9. На последней странице рукописи должны быть подписи всех авторов. Редакция не ставит в известность авторов об изменениях и сокращениях рукописи, имеющих редакционный характер и не затрагивающих принципиальных вопросов.
10. Рукописи, в которых **не соблюдены** данные требования, **возвращаются авторам без рассмотрения**.
11. Редакция оставляет за собой право использовать наиболее интересные статьи в периодических тематических сборниках библиотек журнала. Предоставление редакции рукописи является подтверждением согласия автора на указанное выше использование его произведения.
12. Авторы статей несут ответственность за полноту и достоверность цитируемой в них литературы.
13. За достоверность сведений, изложенных в публикациях, редакция и издатель ответственности не несут.
14. За публикацию материалов, содержащих закрытые сведения, авторы несут персональную ответственность на основании действующих законодательных актов.
15. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленного в редакцию материала принимается редакционной коллегией и является окончательным.
16. Для аспирантов публикация статей бесплатна.