

УДК 681.518.9; 621.384.3

С. С. Анцыферов, А. С. Сигов

Московский технологический университет (МИРЭА), г. Москва  
Россия, 119454, г. Москва, пр. Вернадского, 78

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

S. S. Antsyferov, A. S. Sigov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow  
Russia, 119454, Moscow, Vernadsky ave., 78

## TECHNOLOGICAL BASES OF INTELLIGENT SYSTEMS CONSTRUCTION

С. С. Анциферов, О. С. Сігов

Московський технологічний університет МІРЕА, м. Москва, Росія  
Росія, 119454, м. Москва, пр. Вернадського, 78

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

В статье определены основные принципы практической реализации интеллектуальных систем с помощью компьютерных технологий. Особое внимание уделено технологии создания nano-компьютера. Отмечено, что освоение нанометрового диапазона потребует создания новых физических основ и технологий производства элементной базы. Большие перспективы сулит сочетание биоинформатики и нанобиотехнологии, что позволит создавать интеллектуальные имплантируемые наносистемы для контроля состояния организма на клеточном уровне.

**Ключевые слова:** суперкомпьютер, «кремниевая» технология, энергозависимые запоминающие устройства, реконфигурируемые системы, сверхплотная запись информации, «некремниевая» технология, углеродные нанотрубки, плотность упаковки элементов, квантовый компьютер, кубит, биокомпьютер, массивная параллельная схема, емкость памяти, быстродействие.

The article defines the basic principles of the practical implementation of intelligent systems with the help of computer technology. Special attention is given to the technology of nano-computer development. It was noted that the adoption of the nanometer range requires the development of new physical principles and technologies for production of component basis. The unity of bioinformatics and nanobiotechnology has great prospects allowing to create intelligent implantable nanosystems for monitoring the state of the body at the cellular level.

**Key words:** supercomputer, silicon technology, volatile memory, reconfigurable system, ultradense information recording, nonsilicon technology, carbon nanotubes, component density, quantum computer, qubit, biocomputer, massive parallel circuit, memory capacity, processing speed.

У статті визначено основні принципи практичної реалізації інтелектуальних систем за допомогою комп'ютерних технологій. Особливу увагу приділено технології створення nano-комп'ютера. Відзначено, що освоєння нанометрового діапазону зажадає створення нових фізичних основ і технологій виробництва елементної бази. Великі перспективи обіцяє поєднання біоінформатики і нанобіотехнології, що дозволить створювати інтелектуальні імплантовані наносистеми для контролю стану організму на клітинному рівні.

**Ключові слова:** суперкомп'ютер, «кремнієва» технологія, енергозалежні пристрої, що запам'ятовують, реконфігуровані системи, надгуста запись інформації, «некремнієва» технологія, вуглецеві нанотрубки, щільність упаковки елементів, квантовий комп'ютер, кубіт, біокомп'ютер, масивна паралельна схема, ємність пам'яті, швидкодія.

## Введение

Проблема создания интеллектуальных систем обработки информации, в частности информации пространственно-временных полей [1-11], становится все более актуальной. До настоящего времени наиболее эффективным техническим средством обработки информации является компьютер, компьютерные сети, а также новые интерфейсы, появление которых планируется в период до 2020 г., – мультисенсорные, мультимодульные, мультилингвистические, виртуальные, создающие эффект телеприсутствия, интерфейсы «мозг человека – машина», «мозг-мозг». Компьютерные технологии представляют собой одну из самых перспективных сфер инновационной деятельности. Важной составляющей этих технологий стали суперкомпьютеры (СК) – самые мощные в мире вычислительные системы, используемые при проведении фундаментальных исследований в самых различных областях науки, в том числе при моделировании систем искусственного интеллекта. Основным потребителем суперкомпьютеров являются США. Фирмы Hewlett-Packard и IBM контролируют около 80% мирового рынка суперкомпьютеров, при этом IBM направляет на рынок самые быстрые и самые мощные в мире СК (34,8%). Доля Hewlett-Packard оценивается в 22,7%. В настоящее время промышленно развитые страны активно конкурируют в области создания самых мощных и самых производительных СК (гонка за «флопами»). Так, американская фирма Cray планирует в ближайшей перспективе разработать и выпустить СК Granite и Marble производительностью до 10 PF. Самыми мощными в настоящее время СК являются: СК Milky Way-2 с пиковой производительностью 2,5 PF в Национальном университете оборонных технологий Китая; Cray XT, известный как Jaguar, расположенный в Национальной лаборатории Оук Ридж, с пиковой производительностью 1,75 PF; СК IBM Roadrunner с производительностью 1,04PF в Национальной лаборатории Лос Аламоса; СК Национального института компьютерных наук Университета штата Теннесси – 1,03 PF. В России создана распределенная научная суперкомпьютерная сеть «СКИФ Полигон» – 0,88 PF на базе blade-систем «Т-платформы». Вместе с тем, как показывает практика, высокие мощности и производительности требуют все большего пространства для размещения СК, несмотря на все увеличивающуюся миниатюризацию за счет использования в их конструкции наноконструкций. По оценкам экспертов, уже в ближайшем будущем наступит физический предел используемой в настоящее время технологической платформы на базе кремниевых транзисторных технологий и потребуются совершенно новые компьютерные технологии. К таковым можно отнести технологию создания квантовых компьютеров с использованием ядерного магнитного резонанса, а также создания компьютеров на базе ДНК, т.е. биомолекулярных компьютеров.

## Суперкомпьютеры

Суперкомпьютеры (СК) являются самыми мощными в мире по производительности и объему памяти вычислительными системами. Вместе с тем это достаточно громоздкие и дорогостоящие системы. Так, например, китайский суперкомпьютер «Milky Way-2», занимающий одно из ведущих мест в мире среди 500 самых быстрых суперкомпьютеров (2,5 PF), весит более 150 т, включает более сотни шкафов, имеет несколько тысяч процессоров и видеочипов, стоит около 100 млн долл. Усилия разработчиков СК направлены на повышение быстродействия, емкости памяти, надежности, функциональности и технологичности производства при одновременном снижении материалоемкости, энергопотребления, себестоимости, сложности пользо-

вания и эксплуатации. Основу стратегии совершенствования составляет процесс постоянной миниатюризации элементной базы СК, создаваемой в настоящее время с помощью «кремниевых» технологий.

Существуют фундаментальные ограничения дальнейшего уменьшения размеров БИС: *термодинамические* – обусловлены конечной температурой компонентов, условиями теплообмена, нагреванием, как вследствие протекания тока (джоулевым тепловыделением и условиями теплоотвода), так и увеличением тактовой частоты. Все это приводит к росту энтропии и потере информации в системе; *электродинамические* – вызваны инерционностью емкостных и индуктивных компонентов в схемах, что препятствует быстрому изменению напряжений и токов при переходе от одного состояния к другому, в частности, при работе логических ключей в микропроцессоре или ячеек динамической памяти. Дополнительные ограничения на быстродействие накладывают конечная скорость распространения электромагнитных волн, движения носителей заряда, перемагничивание ферромагнетиков, переполаризация диэлектриков; *квантово-механические* – проявляются при уменьшении характерных размеров компонентов до атомарных масштабов. В этом случае начинает становиться заметной атомная и электронная дискретность в явлениях переноса и взаимодействия частиц. Кроме того, с уменьшением толщины пленки оксида кремния до 1 нм и менее (обычная ее толщина – несколько нанометров), обладающей высокими диэлектрическими свойствами и выполняющей роль изолятора между отдельными элементами БИС начинают сказываться квантовые эффекты туннелирования, приводящие к резкому увеличению тока утечки. Кроме того, одно из узких мест на пути дальнейшей интеграции и миниатюризации БИС является литография с все большим разрешением. Использование наиболее удобного и освоенного оптического способа литографии предопределяет физический предел миниатюризации до нескольких десятков нанометров при экспонировании резиста коротковолновым ультрафиолетовым источником. Для дальнейшего повышения разрешения необходимо применять или более жесткое излучение (рентгеновское, электронное, ионное) или переходить к альтернативным технологиям. Существуют также проблемы при создании систем долговременной памяти, позволяющих хранить информацию в течение длительного срока без обновления и энергопотребления. Так, в рамках существующей концепции, предел миниатюризации записи на магнитном диске практически уже достигнут – вклад одного зерна размером ~ 10 нм в общую намагниченность области, занимаемой битом, измеряется долями процента. Однако поддерживать это соотношение по мере уменьшения размеров бита можно лишь до определенных пределов, поскольку устойчивость намагниченности к термическим флуктуациям падает с уменьшением размеров зерна. Тем не менее не прекращаются поиски путей совершенствования «кремниевой» технологии.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки, направленные на преодоление указанных ограничений. Разрабатываются системы долговременной памяти, основанные на локальных изменениях фазового состояния носителя сфокусированным лазерным пучком, сохранении полученной фазы как угодно долго, обнаружении и считывании записанного бита неограниченное число раз без разрушения информации и при необходимости стирания ее, т.е. возвращения материала в исходное фазовое состояние. Наиболее удобный и освоенный к настоящему времени фазовый переход «кристаллическое состояние – аморфное состояние» уже используется в перезаписываемых компакт-дисках формата DVD. Увеличение быстродействия устройств достигается путем использования бинарных полупроводниковых соединений, харак-

теризующихся высокой подвижностью электронов (In As, In Sb), значительно превышающей (в 30... 50 раз) их подвижность в кремнии. Кроме того, ведутся разработки устройств с использованием напряженного, упруго деформированного кремния. Компания Intel уже применяет его в своих серийных чипах для увеличения скорости переключения ячеек. Деформация решетки кремния всего на 1% дает увеличение скорости переключения в полевом транзисторе до 20% при увеличении себестоимости транзистора всего на 2%. Показательными являются достижения в области накопителей информации на магнитных носителях. Использование эффекта гигантской магниторезистивности позволило существенно увеличить объем энерго-независимой магнитной памяти. Американская компания VeSang Inc ведет разработки первой в мире кремниевой нанопамяти по трехмерной архитектуре. Активно ведется не только разработка, но и коммерческий выпуск энергонезависимых запоминающих устройств (чипов) с ферромагнитными миниатюрными ячейками (~2,5 нм). Такие устройства являются важным компонентом при разработке реконфигурируемых логических элементов. Кроме того, создаются схемы переключения транзисторов (в современных микропроцессорах транзисторы как бы жестко «прошиты») для быстрого реконфигурирования различных систем.

В России проводится ряд перспективных исследований. Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф. В. Лукина ведет разработку однолитографических технологий. Данная разработка позволит стабилизировать технологические операции, обеспечить хорошую воспроизводимость предельно минимальных размеров и минимизацию привносимых дефектов. Исследование технологии создания нитевидных полупроводниковых нанокристаллов проводится в Санкт-Петербургском физико-технологическом научно-образовательном центре РАН. Работа направлена на создание новых полупроводниковых наноматериалов и наносистем с контролируемыми свойствами, которые могут использоваться в производстве полевых транзисторов. Центральный научно-исследовательский технологический институт «Техномаш» разрабатывает наноструктурированные материалы молекулярной фотоники и слоистых структур на их основе для оптической нейросетевой обработки информации. Применение этих материалов позволит создавать трехмерные функциональные структуры, а также информационные системы с параллельной обработкой информации, на несколько порядков превосходящие по быстродействию традиционные системы. Исследования магнитного состояния составных наноструктур методами нейтронного отражения и рассеяния проводит Объединенный институт ядерных исследований. Установлено, что составные наноструктуры могут быть использованы для создания логических элементов с четырьмя состояниями, что позволит значительно увеличить емкость запоминающих устройств. В Воронежском государственном университете проводятся работы по исследованию наноструктур для электронной техники нового поколения, а также изучению свойств наноразмерных гетерогенных систем, структур и нелинейных материалов. Исследуются нанокристаллы, функциональные материалы на основе слоистых и наногранулированных структур, материалы с поверхностями, модифицированными малоатомными кластерами и наночастицами. Разработаны образцы релаксорных сегнетоэлектриков, технология формирования в тонкопленочных сегнетоэлектриках нанодоменов с размерами, обеспечивающими возможность создания перепрограммируемых энергонезависимых запоминающих устройств с большой емкостью. Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН занимается фундаментальными исследованиями в области разработки одномерных структур на основе полупроводниковых гетероструктур GaAs / AlGaAs с дву-

мерным электронным газом и пластин кремния на изоляторе. Исследуются свойства квазиодномерных наноматериалов, содержащих проводящие металлоцепочки атомных размеров. Результаты исследований служат технологической основой для сверхплотной записи и хранения информации. Технический университет НПК «Технологический центр» МИЭТ занимается созданием электронных приборов на базе гетероструктур, в частности, транзисторов с высокой подвижностью электронов, туннельно-резонансных диодов, гетероструктурных биполярных транзисторов. НИЦ «Курчатовский институт» осуществляет разработку голографической памяти сверхвысокой емкости. Вместе с тем, многие специалисты считают, что революционные преобразования информационной суперкомпьютерной техники произойдут за пределами «кремниевой» парадигмы.

Радикальная стратегия развития «некремниевой» электроники отказывается от использования кремния в качестве основы интегральных схем и предполагает разработку новых нанотехнологий. Исследователям и технологам совершенно очевидными представляются огромные возможности промышленного применения углеродных нанотрубок, представляющих собой свернутые в цилиндр наносетки, состоящие из шестиугольных модулей на основе атомов углерода. Эти трубки обладают уникальными электрическими и магнитными характеристиками. Трубки обладают исключительно малым диаметром (несколько нм), их архитектура может иметь различную конфигурацию, что зависит от функциональных особенностей их применения. Например, туннельные углеродные нанотрубки могут использоваться в транзисторах, а трубки на основе структур с гетерогенными переходами или так называемые структуры «нейронного древа» – при создании когнитивных систем, моделировании нейронных сетей мозга и искусственного интеллекта. Нанотрубки со свойствами полупроводников могут использоваться в полевых транзисторах подобно кремнию. При этом роль регулируемого проводящего канала играет нанотрубка, а роль изолированного затвора – кремниевая подложка с тонкой пленкой оксида на поверхности. Изменение напряжения на затворе от +6 до -2В меняет величину проводимости канала почти в  $10^5$  раз. За несколько лет развития (впервые возможность создания транзистора на нанотрубке была продемонстрирована в 1998 г.) удалось значительно улучшить характеристики нанотрубчатых полевых транзисторов и приблизить их к таковым у лучших «кремниевых» при значительно меньших размерах. На этих же принципах удалось построить экспериментальные логические устройства и ячейки памяти. Так, группой американских специалистов в качестве ячейки памяти было предложено использовать короткую, закрытую с двух сторон трубку, с размещенной в ней молекулой фуллерена  $C_{60}$ . Силы Ван-дер-Ваальса между молекулой и трубкой нарастают вблизи концов нанотрубки, что приводит к возникновению двухъямного потенциала. Одному крайнему положению молекулы можно приписать логический «0», а другому – логическую «1». Переключение между этими состояниями обеспечивается размещением атома металла в полость молекулы фуллерена. В результате ионизации металла, атом приобретает заряд. Приложение электрического поля вдоль оси трубки приводит к перемещению молекулы из одного крайнего положения в другое. Отключение поля не приводит к изменению достигнутого состояния, поскольку молекула находится в одной из двух потенциальных ям. В результате реализуется долговременная память без энергопотребления. Исследователи из Гарвардского университета предложили конструкцию запоминающей матрицы, в которой два ряда нанотрубок расположены под углом  $90^\circ$  в параллельных плоскостях, разделенных зазором 1-2 нм. Такая система имеет двухъямный энергетический профиль, который

создается силами упругости в самих трубках и ван-дер-ваальсовыми силами притяжения между ними. Приложение разности потенциалов к любой паре трубок, принадлежащим разным слоям, т.е. к выбранному узлу матрицы, вызывает изгиб верхней трубки и ее притяжение к нижней. При напряжении порядка единиц вольт происходит касание трубок и сопротивление между ними падает на несколько порядков, что легко обнаруживается соответствующей электроникой. Силы Ван-дер-Ваальса удерживают трубки в контакте и после снятия напряжения, что обеспечивает энергонезависимость памяти. Стирание запомненного бита информации осуществляется приложением напряжения одинаковой полярности к трубкам данного узла, что приводит к расцеплению трубок и возвращению ячейки памяти в исходное состояние. Результаты исследований показывают, что данная технология позволяет создавать матрицы динамической памяти с размерами ячеек  $5 \times 5$  нм, плотностью записи  $\sim 10^{12}$  бит/см<sup>2</sup> и быстродействием  $\sim 100$  ГГц. Показана возможность создания подобной запоминающей матрицы на нанотрубках, но с внутренним изолирующим слоем из нитрида кремния, содержащим глубокие ловушки электронов. Планируется создание устройств, содержащих до 400 млрд. нанотрубок в одном мм<sup>2</sup>, что существенным образом повлияет на качество соответствующей продукции электронной промышленности. Технологическими исследованиями в области разработки нанотрубок и их применением занимаются такие глобальные корпорации и научные организации как IBM, Intel, NASA, NEC в США, Samsung и Shova Denko Com – panies в Японии, Институт М. Планка в Германии, НИЦ «Курчатовский институт» в России и др.

Итак, одно из основных преимуществ электроники на нанотрубках – плотность упаковки элементов, недостижимая в кремниевой технологии, при вполне приемлемых электрических характеристиках. В настоящее время осуществляется переход от лабораторных образцов к массовой технологии: созданы способы выращивания и управления ростом нанотрубок, их сортировки и встраивания в заданные конфигурации. Вместе с тем сдерживающий фактор массового использования нанотрубок – отсутствие технологии выращивания их в больших количествах и простых способов соединения в необходимые электрические схемы. Большинство описанных в публикациях устройств на нанотрубках создано в единичных экземплярах в лабораторных условиях ценой больших затрат времени и труда. Кроме того, их характеристики не отличаются хорошей воспроизводимостью и надежностью. Таким образом, на пути к массовому применению безкремниевых технологий предстоит, по-видимому, преодолеть еще немало препятствий технического характера.

Необходимо также отметить, что ключом к успешному развитию нано-суперкомпьютерной технологии является стандартизация. Международная организация по стандартизации (ISO) и Международная электротехническая комиссия (IEC) совместно разработали, в качестве предшественника Международного стандарта, объемные Технические условия для терминологии в области нанотехнологии (ISO/TS 80 004). Сюда вошли особые термины и определения, касающиеся нанообъектов и наноструктурированных материалов, углеродных нанообъектов, нанометрологии, нанопроизводственных процессов.

## Квантовые компьютеры

Квантовый компьютер – это вычислительная машина, использующая уникальные квантово-механические эффекты, такие как интерференция, параллелизм, суперпозиция, запутанность, для выполнения совершенно новых видов вычислений, которые, даже в принципе, невозможно выполнить на одном классическом компью-

тере. Так, если квантовый компьютер состоит из  $n$  кубитов (квантовых битов), то он может иметь одновременно  $2^n$  различных состояний кубитов, классический же компьютер может иметь только одно из  $2^n$  состояний в одно и то же время. Кубиты в квантовых компьютерах могут находиться в суперпозиции (совмещении), сочетании включения и выключения в одно и то же время, т.е. отвечая законам квантовой механики. Коммутации в чипах современных компьютеров находятся в одном из состояний: либо включены, либо выключены. Квантовый компьютер работает посредством манипулирования кубитами на основе фиксированной последовательности, установленной квантовой логической схемой, называемой квантовым алгоритмом. В качестве кубитов могут использоваться фотоны и отдельные атомы. Свойство суперпозиции позволяет квантовому компьютеру производить вычисления за несопоставимо более короткий срок, чем традиционному компьютеру. Например, для разложения числа длиной в сотни цифр на два простых множителя самому быстрому современному суперкомпьютеру потребуется времени сотни миллиардов лет, для квантового компьютера – несколько десятков минут. Основное преимущество квантового компьютера проявляется при необходимости выполнить неограниченно большое количество параллельных вычислений, когда интерес представляет не их результаты сами по себе, а только некоторая их комбинация. Разработкой квантовых компьютеров в настоящее время занимаются специалисты многих промышленно развитых стран мира. Большие исследования по созданию квантовых компьютеров проводятся в США, в частности, Национальным институтом стандартов и технологий – NIST. NIST использует при обработке квантовой информации ионы, нейтральные атомы и «искусственные атомы», созданные на основе эффекта сверхпроводимости. Учеными Национальной академии наук США был подготовлен для администрации президента США доклад «Вторая квантовая революция», в котором отмечается, что создание квантовых компьютеров будет в значительной степени опираться на результаты развития нанотехнологии. Военное агентство США DARPA реализует программу «Квантовые суперпозиции в науке и технологиях», в рамках которой проводятся исследования по созданию технологий, основанных на использовании законов квантовой механики, в том числе по созданию квантовых алгоритмов и квантовых компьютеров. Ученые Принстонского университета и Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли создали важный элемент квантового компьютера – систему гибридной памяти для хранения квантовой информации в 1 кубит на основе электрона и ядра атома фосфора, помещенных в кристалл кремния. Преимущество такой системы в том, что она основана на традиционной силиконовой технологии и совместима с традиционными компьютерами. Специалисты из Национальной лаборатории высокомагнитных полей и Университета штата Флорида создали сложный композитный материал, состоящий из элементов калия, ниобия и кислорода с ионами хрома, перспективный для использования в технологии квантовых компьютеров. В ЕС проект «Использование кубита» реализуется Научно-исследовательским консорциумом из 35 академических и промышленных групп. Одна из основных задач консорциума – разработка и реализация методов обработки квантовой информации, создание оборудования для систем квантовой криптографии, работающих на больших расстояниях. Кроме того, в ЕС, в рамках программы «Наука за пределами научной фантастики», действует подпрограмма «Обработка квантовой информации и коммуникации в Европе». В настоящее время в ЕС проводятся исследования по такому направлению как масштабируемость и модульная

наращиваемость квантовых информационных систем. Такая компьютерная архитектура позволит не только создать интерфейс с квантовыми коммуникациями, но и в недалекой перспективе квантовые информационные сети. В Японии, также как в США и ЕС, проводятся исследования по разработке и созданию «элементной базы» квантового компьютера: системы захвата соответствующими ловушками ионов и нейтральных атомов; квантовые электродинамические резонаторы.

## Биокомпьютеры

Идея создания биокомпьютера принадлежит американскому проф. Л. Алдеману из Калифорнийского университета (1994 г.). Первая модель, имитирующая работу «молекулярной машины» в живой клетке, была создана в 1999 г. израильским профессором И. Шапиро из Вейцмановского научно-исследовательского института естественных наук. В 2001 г. И. Шапиро реализовал модель в реальном биокомпьютере, состоявшем из молекул ДНК, РНК и специальных ферментов. Молекулы фермента выполняли роль аппаратного обеспечения, а молекулы ДНК – программного. Специалисты Колумбийского университета создали ДНК-компьютер на основе ДНК-схемы со средней степенью интеграции и самым высоким быстродействием. Компьютер предназначен для научных исследований в медицине и биологии. Американское агентство DARPA разработало проект Bio-Comp по созданию мощных биовычислительных систем на основе ДНК. Кроме того, создается мощный симулятор Bio-SPICE для визуализации средствами машинной графики биомолекулярных процессов с целью управления процессами взаимодействия белков и генов. Фирма Olympus Optical создает коммерческую версию составного ДНК-компьютера, включающего молекулярную и электронную части, и предназначенного для проведения генетического анализа. Эксперты прогнозируют в недалеком будущем ДНК-компьютеры в качестве нанофабрики лекарств, т.е. в перспективе ДНК-нанокompьютеры, будучи помещены в клетку, смогут осуществлять наблюдение за потенциальными болезнетворными изменениями и синтезировать соответствующие лекарства для борьбы с ними. Подобный, имплантируемый в клетку компьютер, создали ученые Гарвардского и Принстонского университетов. Компьютер предназначен для контроля деятельности генов внутри клеток, для определения мутированных генов, а также раковых клеток. Фактически, такого рода компьютеры являются инструментами для чтения клеточных сигналов и могут перевести сложную клеточную сигнатуру, деятельность множества генов, в читаемую информацию на выходе клетки. Кроме того, они могут быть запрограммированы на маркировку больных клеток, для которых необходимо клиническое лечение, или на самостоятельное терапевтическое воздействие. Возможность направлять лечение только на патологические клетки, не затрагивая здоровые, является наиболее важным результатом создания клеточных или биомолекулярных компьютеров. В настоящее время активно разрабатывается направление, связанное с созданием биокомпьютеров на основе нейроподобных элементов, что позволит сделать эти компьютеры самопрограммируемыми со способностью принимать самостоятельные решения.

В настоящее время специалистами США (Техасский университет, Массачусетский технологический институт, Лаборатория в Беркли) и других промышленно развитых стран мира проводятся исследования по созданию технологий хранения и обработки информации в биологических системах, а также по созданию биокомпью-

теров: генетических (ДНК / РНК) и клеточных. ДНК- или биомолекулярный компьютер представляет собой комбинацию специально подобранных нитей ДНК, обеспечивающую выполнение конкретных вычислительных операций. Основные преимущества ДНК-компьютеров:

- возможность создания массивных параллельных схем, недоступных для традиционных компьютеров, работающих на кремниевых чипах. Это обеспечивает выполнение сложнейших математических расчетов за исключительно короткое время, измеряемое в минутах. Для выполнения таких же расчетов традиционным компьютером потребуются месяцы и годы;

- огромная емкость для хранения данных. Так, 453 г ДНК-молекул обладают емкостью для хранения данных, превосходящей суммарную емкость всех современных компьютеров, а 10 трилл. ДНК-молекул занимают объем в 1 см<sup>3</sup>, чего достаточно для хранения объема информации в 10 ТБ;

- использование не бинарного, а тернарного кода, когда информация кодируется тройками нуклеотидов;

- высокое быстродействие ( $\sim 10^{14}$  опер/с) за счет одновременного вступления в реакцию триллионов молекул ДНК;

- высокая плотность хранения данных, в триллионы раз превышающая показатели современных оптических дисков;

- низкое энергопотребление.

Вместе с тем, существует и ряд серьезных проблем, возникающих при разработке биокомпьютеров: сложность считывания результатов вычислительных операций, ошибки в вычислениях, – точность в 1% явно недостаточна; с течением времени ДНК распадаются, а результаты вычислений исчезают.

## Выводы

В настоящее время возможности «кремниевых» технологий до конца еще не исчерпаны и при наличии больших производственных мощностей, отлаженного производства, специалистов, инфраструктуры, разогретых рынков сбыта это направление еще долго будет занимать на рынке доминирующие позиции.

Освоение нанометрового диапазона потребует создания принципиально новых физических основ и технологий производства элементной базы суперкомпьютеров, которые в общих чертах просматриваются уже сейчас.

Созданием «элементной базы» квантового компьютера интенсивно занимается целый ряд научно-исследовательских организаций ведущих стран мира, что создает хорошие предпосылки для практической реализации совершенно новых видов вычислений, в принципе невозможных для классических компьютеров.

Достижения биоинформатики в сочетании с нанобиотехнологией приведут в недалеком будущем к созданию интеллектуальных имплантируемых наносистем, обеспечивающих контроль состояния организма на клеточном уровне.

## Список литературы

1. Анцыферов С. С. Формирование спектра тепловых изображений объектов и распознавание их образов / С. С. Анцыферов // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66, № 12. – С. 44-48.
2. Анцыферов С. С. Формирование спектра тепловых изображений объектов и распознавание их образов / С. С. Анцыферов // J. Opt. Technol. – 1999. – v. 66, № 12. – P. 1047- 1049.
3. Анцыферов С.С. Адаптация информационно-распознающих биомедицинских систем / С. С. Анцыферов, Н. Н. Евтихийев, Б. И. Голубь // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2001. – № 1. – С. 5-9.

4. Анцыферов С. С. Технология адаптивной обработки информации тепловых широкоспектральных полей / С. С. Анцыферов, Н. Н. Евтихий, Б. И. Голубь // Научные технологии. – 2002. – Т. 3, № 4. – С. 45-50.
5. Анцыферов С. С. Метрология виртуальных систем / Анцыферов С. С. // Измерительная техника. – 2003. – № 5. – С. 17-21.
6. Анцыферов С. С. Адаптивные системы распознавания образов пространственно-временных полей / С. С. Анцыферов, Н. Н. Евтихий // Искусственный интеллект. – 2004. – № 3. – С. 405-416.
7. Анцыферов С. С. Адаптивная обработка информации пространственно-временных изотропных полей / С. С. Анцыферов, Н. Н. Евтихий // Оптический журнал. – 2006. – Т. 3, № 10. – С. 52-57.
8. Анцыферов С. С. Вопросы метрологического обеспечения интеллектуальных систем / С. С. Анцыферов // Мир измерений. – 2012 – № 5. – С. 46-51.
9. Анцыферов С. С. Метрологические основы формирования информационного пространства образов в интеллектуальных системах обработки / С. С. Анцыферов // Искусственный интеллект. – 2012. – № 4(58). – С. 283-291.
10. Анцыферов С. С. Быстродействие интеллектуальных систем / С. С. Анцыферов, К. Е. Русанов // Искусственный интеллект. – 2013. – № 4(62). – С. 259-265.
11. Анцыферов С. С. Стандартизация показателей качества продукции когнитивных технологий // Научные технологии. – 2014. – Т. 15, № 7. – С. 7-13.
12. Анцыферов С. С. Проблемы искусственного интеллекта / С. С. Анцыферов // Проблемы искусственного интеллекта. – 2015. – № 0 (1). – С. 5-12.

## References

1. Antsyferov S. S. Forming the spectrum of thermal images of objects and recognize their images // J. Opt. Technol, 1999, v. 66, № 12, p. 44-48.
2. Antsyferov S. S. Forming the spectrum of thermal images of objects and recognize their images // J. Opt. Technol, 1999, v. 66, № 12, p. 1047- 1049.
3. Antsyferov S. S., Evtikhiev N. N., Golub B. I. Adaptation of information and recognition of biomedical systems // Biomedical Radioelectronics, 2001, № 1, p.5-9.
4. Antsyferov S. S., Evtikhiev N. N., Golub B. I. Adaptive information processing technology of thermal wide spectral fields // Science Intensive Technologies, 2002, v.3, № 4, p. 45-50.
5. Antsyferov S. S. Metrology virtual systems // Measurement technology, 2003, № 5, p. 17-21.
6. Antsyferov S. S., Evtikhiev N. N. Adaptive pattern recognition system of spatio-temporal fields // Artificial Intelligence, 2004, № 3, p. 405-416.
7. Antsyferov S. S., Evtikhiev N. N. Adaptive information processing of spatiotemporal isotropic fields // J. Opt. Technol, 2006, V.3, № 10, p. 52-57.
8. Antsyferov S. S. Questions of metrological maintenance of intelligent systems // World of measurement, 2012, № 5, p. 46-51.
9. Antsyferov S. S. Metrological basis of the information space in intelligent processing systems // Artificial Intelligence, 2012, № 4 (58), p. 283-291.
10. Antsyferov S. S., Rusanov K. E. Processing speed of intelligent systems // Artificial Intelligence, 2013, № 4 (62), p. 259-265.
11. Antsyferov S. S. Standardization of indicators of quality of products cognitive technologies // Science Intensive Technologies, 2014, vol. 15, № 7, p. 7-13.
12. Antsyferov S. S. Problems of Artificial Intelligence / S. S. Antsyferov // Problems of Artificial Intelligence. – 2015. – № 0 (1). – S. 5-12.

## RESUME

S. S. Antsyferov, A. S. Sigov

### *Technological Bases of Intelligent Systems Construction*

**Materials and methods:** The giant magnetoresistance effect has allowed significantly increasing the capacity of non-volatile magnetic memory. Devices with ferromagnetic miniature cells (~2,5 nm) are an important component in the development of reconfigurable logic elements. Furthermore, the switching transistor circuits (transistors in modern microprocessors have a strong firmware) are created for rapid reconfiguration of the

various systems. There were developed the methods of growing and managing the growth of nanotubes, of their sorting and embedding into the configuration sets. A quantum computer operates by manipulating qubits based on a fixed sequence determined by a quantum logic circuit, which is called the quantum algorithm. Specialists conducted a study on the creation of information storage and processing technologies in biological systems, as well as the creation of bio-computers: genetic (DNA / RNA) and cell ones. DNA or biomolecular computer is a combination of specially selected strands of DNA, which provides the performance of specific computing operations.

**Results:** There are fundamental limits to further reduction of the LSI size: thermodynamic, electromagnetic and quantum mechanical ones. There are also problems in creating long-term memory systems to store information for a long period without energy consumption and updating. Limiting factor of the mass use of nanotubes is the lack of the technology of growing them in large quantities, and simple ways of connecting them into the required electrical circuits. The key to the successful development of nano-supercomputer technology is standardization. There are a number of serious problems arising from the development of bio-computers: the difficulty of reading the results of computational operations and calculation errors, - accuracy of 1% is obviously insufficient; the DNA breaks down over time, and the calculation results disappear.

**Conclusion:** Adoption of the nanometer range will require fundamentally new physical principles and technologies of production of component basis of supercomputers, which are already discussed in general terms. Achievements in bioinformatics along with the nanobiotechnology will lead in the near future to the creation of smart implantable nanosystems providing control of the body condition at the cellular level.

Статья поступила в редакцию 05.02.2016.