

*Граничин Олег Николаевич,
Шалымов Дмитрий Сергеевич*

НОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА БУДУЩЕГО

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существующие вычислительные устройства не позволяют быстро и эффективно решать ряд сложных многомерных задач, связанных с быстроизменяющимися сложными динамическими процессами и имеющими большое экономическое, государственное и оборонное значение (распознавание изображений и речи, поиск целей, динамика иерархий структур в живых системах, кластеризация в потоках концентрированных дисперсных смесей и т. п.).

В качестве общей математической модели для описания алгоритмов в 1936 г. английским математиком А. Тьюрингом было предложено абстрактное вычислительное устройство, которое назвали машина Тьюринга (МТ) [1]. МТ сыграла и продолжает играть важную роль в теории информатики, а вычислимость при помощи МТ стала признанным определением процедуры. В том же году А. Черчем была высказана гипотеза, что любой процесс, который интуитивно мог бы быть назван процедурой, реализуем машиной Тьюринга [2]. Физическая переформулировка этого принципа гласит: любое физическое вычислительное устройство может быть представлено в виде автомата, обрабатывающего биты «0» и «1».

В последнее время обоснованность тезиса Черча-Тьюринга подвергается серьезной критике [3]. Прежде всего вызы-

вает сомнение общепринятая ранее физическая переформулировка этого принципа, так как многие современные исследования показывают невозможность удовлетворительного представления в виде конечного автомата некоторых важных физических процессов.

Задача создания элементной базы принципиально нового поколения вычислительных устройств, способных быстро и эффективно решать трудные перечисленные выше проблемы, до настоящего времени остается нерешенной, хотя в этой области работает большое количество исследовательских лабораторий, специализирующихся в основном в сфере использования неорганических материалов. В значительной степени причина неудач заключается в использовании слишком простых базовых структур, отвечающих требованиям традиционной машины Тьюринга и неадекватных уровню сложности современных нерешенных задач.

Наиболее вероятно, что в основе работы будущих вычислительных устройств и систем нового типа будет лежать асинхронная работа набора параллельных процессов. В качестве одного из процессов может выступать, например, эволюция квантового бита (кубита) или регистра классического компьютера. Квантовый бит представляет собой квантовую систему двух состояний. Такая система может принимать не только базисные состояния и, следовательно, способна хранить боль-

ше информации, нежели соответствующая классическая. Тем не менее, при измерении такой системы она переходит в одно из базисных состояний, и информация, хранящаяся в ней, будет соответствовать некоторой классической информации. Следует учесть, что, взаимодействуя с окружающей средой, состояние квантового бита постоянно изменяется со временем (эволюционирует). В определенные моменты времени в эволюции лежащих в основе процессов будут происходить скачкообразные изменения. Как правило, подобные изменения вызваны ограниченностью доступных ресурсов и необходимостью перераспределения их между процессами. При описании математической модели таких новых устройств нельзя пользоваться только «грубыми» дискретными приближениями. Это вызвано тем, что большинство реальных физических процессов имеет принципиально нелинейный характер. Поэтому малейшие неточности в начальных условиях могут даже на «коротких» временах приводить к существенным «разбросам» траекторий. Это обуславливает необходимость изучения нового типа вычислительных систем как стохастических гибридных. То есть должны рассматриваться системы, основанные на процессах двойственной природы: с одной стороны, они эволюционируют, являясь непрерывными, с другой – способны резко в случайные моменты времени изменять свое состояние, являясь дискретными.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА НОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Размеры вычислительных устройств постоянно уменьшаются. Когда-то предполагалось, что более мощные машины будут требовать больше места для периферийных устройств, памяти и т. д. Это предположение оказалось неверным. В 1965 г. Г. Мур [4] сформулировал действующее и сейчас правило (позже названное законом Мура), согласно которому производитель-

ность вычислительных систем удваивается каждые восемнадцать месяцев. Г. Мур вывел свой эмпирический закон, построив зависимость числа транзисторов в интегральной микросхеме от времени. Как следствие из этого закона можно вывести темпы миниатюризации отдельного транзистора.

Быстрое развитие цифровых электронных технологий приводит к тому, что размер элементарного вычислительного устройства приближается к размеру молекулы или даже атома. На таком уровне законы классической физики перестают работать и начинают действовать квантовые законы, которые для многих важных динамических задач еще не описаны теоретически.

Р. Фейнман [5] обосновал невозможность представления результатов квантовой механики на классическом универсальном вычислительном устройстве даже с использованием вероятностных алгоритмов. Это связано с тем, что число элементарных операций такого вычислительного устройства будет расти экспоненциально с ростом числа степеней свободы системы. Именно поэтому для точного моделирования квантовых систем Фейнман предложил теоретическую модель квантового компьютера и обосновал ее «экспоненциальное» преимущество над классической. Д. Дойч [6] построил модель такого универсального компьютера, основанную на идее квантовых вычислений, и показал, как квантовый компьютер может моделировать физические системы, которые находятся за пределами области, доступной универсальной машине Тьюринга. Модель Дойча представляет собой новый подход к проблеме создания современных вычислительных устройств, но, по своей сути, она остается дискретной.

Стремление к увеличению быстродействия вычислительных устройств и уменьшению их геометрических размеров с неизбежностью приводит к необходимости рассмотрения операций с переходными процессами. Вместо примитивных опера-

ций с классическими битами, в будущем было бы естественно перейти к операциям, задаваемым теми или иными динамическими моделями микромира. Под примитивной «моделью» вычислений можно, в частности, понимать и выполнение классических операций с битами. Конечно же, введение более широкого класса примитивных моделей было бы более обоснованным, если бы удалось для функции, значения аргументов которой записаны в регистре битов, определить операцию, эффективно выполняющую, например, преобразование Фурье. Причем может оказаться реальным предположение о том, что время на ее выполнение будет вполне соизмеримым с временем выполнения одной классической операции, так как операции типа «свертки» функций вполне могут быть обнаружены «в природе». Последние исследования похожих моделей показывают, что их выполнение за счет присущей природе способности к самоорганизации не обязательно «раскладывается» на более простые составляющие, то есть не всегда может быть записано в виде классического алгоритма.

В некотором смысле переход к разработке и созданию моделей сложных вычислений – закономерный этап развития микропрограммирования. Понимание возможных преимуществ работы устройств с эффективным микрокодом отмечалось еще в 50-е гг. прошлого века. Во втором ряду серии ЕС ЭВМ в конструкцию была заложена возможность динамического микропрограммирования. Хорошо известен целый ряд ЭВМ от «Мир-1» до «Эльбрус», использующих языки высокого уровня (HLL) как машинные. На кафедре системного программирования СПбГУ до сих пор изучают компьютер «САМСОН», при создании которого удалось разработать эффективную технологию микропрограммирования [7]. В настоящее время технологии микропрограммирования естественным образом сдвигаются в сторону физических процессов.

В мировой практике рассматриваются несколько возможных основных на-

правлений создания элементной базы сверхбыстрого вычислительного устройства (СВУ) нового поколения: компьютеры, работающие:

- на принципе ядерного магнитного резонанса в жидкостной молекулярной фазе («Liquid state molecular NMR quantum computer») [8],

- на атомных ионах, помещенных в ловушки Пауля (Paul) или Пеннинга (Penning) («Ion trap quantum computer») [9],

- с использованием ядерного магнитного резонанса или электронного парамагнитного резонанса в твердом теле («Solid state NMR/EPR quantum computer») [10],

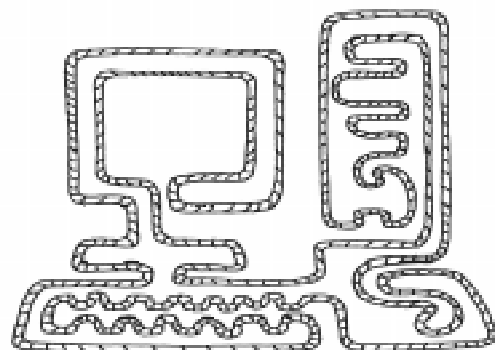
- с использованием явления сверхпроводимости («Superconducting systems») [11],

- на квантовых точках в полупроводниковых неорганических системах («Quantum dot computer») [12, 13],

- на основе оптической симуляции квантовой логики («Optical computer») [14],

- на металло-биологической гибридной основе («Hybrid quantum computer») [15, 16, 17].

Многие из рассмотренных направлений имеют существенные недостатки, которые в некоторых случаях приводят к принципиальной невозможности создания конкурентоспособного вычислительного устройства. Характерным примером являются устройства, работающие на принципе ядерного магнитного резонанса в жидкостной молекулярной фазе [8]. Корпорация IBM только на первый этап разра-



ботки молекулярной элементной базы новых СВУ – создание макета, реализующего алгоритм П. Шора [18], основанный на квантовом преобразовании Фурье, выделила 17 млрд USD на 5 лет. В результате был создан NMR макет, оперирующий с 5 или 7 квантовыми битами и весом около 7 тонн, способный решать только примитивные задачи типа факторизации двухзначных чисел.

В настоящее время наиболее перспективным направлением разработки элементной базы компьютеров нового поколения представляется использование самоорганизующихся квантовых точек в твердотельных системах, которые могут выполнять функции квантовых битов и быть связанными в квантовый регистр на основе, например, электростатического или магнитного типа взаимодействия.

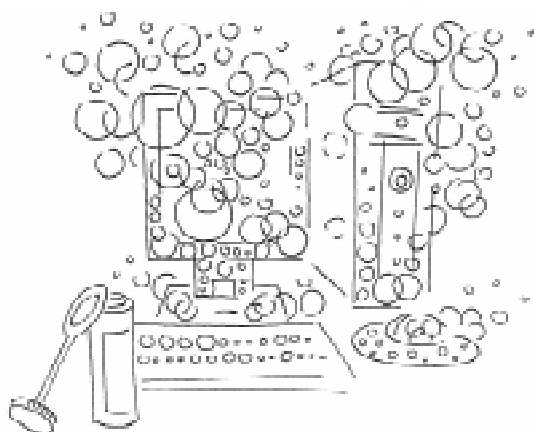
Инициированная основополагающими работами в этом направлении, выполненными под руководством академика Ж.И. Алфорова (лауреат Нобелевской премии в области физики полупроводников), процедура приготовления квантовых точек в полупроводниковых неорганических системах известна и всесторонне изучена. Однако прямое применение этих ведущихся разработок для изготовления элементов квантовых компьютеров представляется по ряду причин проблематичным. Так, для надежной работы квантовых устройств необходима высокая степень кван-

товой когерентности отдельных квантовых битов, которая может быть обеспечена только в идеально упорядоченной системе (сверхрешетке) квантовых точек строго одинакового размера. Воспроизводимое изготовление подобных систем, содержащих 1000 и более квантовых точек, в рамках существующих методик является в высшей степени затруднительной задачей. Нерешенной проблемой является также обеспечение возможности индивидуальной адресации каждой квантовой точки (квантового бита), как это необходимо для работы квантового вычислительного устройства.

ГИБРИДНЫЕ МЕТАЛЛО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАНОСТРУКТУРЫ

На сегодняшний день сотрудникам группы Молодцова С.Л.¹ удалось разработать методику выращивания сверхрешеток гибридных биологических наноструктур на основе кластеров (квантовых точек) магнитных металлов, внедренных в упорядоченные матрицы протеинов, входящих в состав различных культур бактерий, с характерными размерами 10 нм (0,01 мкм) [16, 17]. Такие магнитные квантовые точки могут рассматриваться как квантовые биты квантовых компьютеров. При этом можно говорить о возможности создания устройств с характерными линейными размерами в пять-десять раз меньше существующих и содержащих несколько тысяч квантовых битов в одном регистре. Принципиально новые возможности связаны с тем, что квантовые точки соединяются протеинами, которые можно функционализировать в зависимости от конкретных задач вычислительного процесса. В качестве функционализированных элементов вместо протеинов могут быть использованы ДНК (или металлизированные ДНК).

Обычно культуры бактерий покрыты поверхностным слоем протеинов («bacterial surface layer» или «S layer») [19], кото-



¹ Выпускник физического факультета ЛГУ, доктор физико-математических наук, в настоящее время профессор кафедры Физики поверхности и микроструктур Технического университета Дрездена.

рый предохраняет бактерии от неблагоприятных внешних воздействий. S layer представляют собой упорядоченные двумерные протеиновые кристаллы различной точечной симметрии ($p1$, $p2$, $p3$, $p4$ и $p6$). Протеиновые структуры, имеющие 4-угольную и 6-угольную организацию, изображены на рис. 1. Расстояние между отдельными морфологически эквивалентными элементами (постоянными решетки) составляет от 3 до 30 нанометров. Поверхностные слои протеинов имеют толщину от 5 до 15 нанометров и упорядоченную структуру сквозных отверстий (пор) диаметром от 2 до 6 нанометров, которые могут быть заполнены, например, кластерами различных металлов.

Способность к самоорганизации (упорядоченной сборке) отдельных протеиновых мономеров в двумерные массивы большой площади на поверхности гладких твердотельных подложек [20] позволяет рассматривать S layer в качестве идеальных масок для выращивания наноструктур (квантовых точек) с заданными физическими, электрическими или магнитными свойствами. Следует особо отметить возможность выращивания упорядоченных структур металлических кластеров с латеральными плотностями, намного превышающими структурные плотности, доступные в современных приборах микроэлектроники [21].

ГИБРИДНЫЕ МЕТАЛЛО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Элементная база компьютеров нового поколения должна отвечать целому ряду требований. В частности, для эффективной работы СВУ количество кубитов носителей информации должно быть порядка или более 1000. Предварительные разработки показали, что гибридные наноструктуры могут обеспечивать необходимое количество элементарных носителей информации. Принципиальным фундаментальным шагом является выбор физичес-

кого явления (например, электрическое или магнитное взаимодействие), лежащего в основе работы СВУ. В соответствии с выбранным явлением, должен быть решен вопрос обеспечения необходимых квантовых корреляций между элементарными носителями информации (квантовыми точками). Кроме того, должны быть решены технические проблемы инициализации квантового регистра, записи и считывания информации.

Являясь принципиально неунитарной операцией, в которой участвуют два и более операнда, инициализация (приведение в устойчивое основное состояние) магнитного квантового регистра в принципе может быть осуществлена приложением достаточно сильного магнитного макрополя одновременно ко всем квантовым битам.

Как запись, так и считывание информации предполагает необходимость адресации каждого отдельного квантового бита. Локальная адресация теоретически возможна при использовании существующих приборов. Однако скорость и эффективность подобной адресации ограничена использованием сложного микроскопического оборудования.

В [22] предлагается альтернативный подход, основанный на использовании проводящих двумерных наносеточных структур, фиксированных на поверхности упорядоченных массивов квантовых нанокластеров с четырехкратной точечной симметрией ($p4$, рис. 2). При этом, в зависимости от необходимости, биологическая матрица может быть оставлена или удалена ионным травлением.

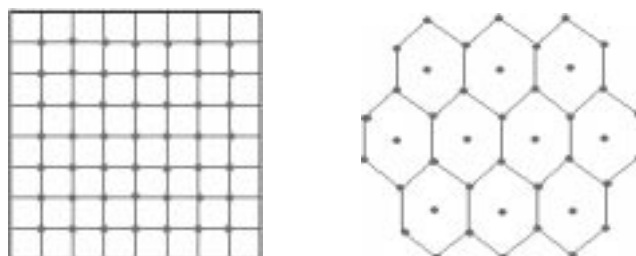


Рис. 1. 4-угольная организация $p4$ и 6-угольная организация $p6$ протеиновых структур

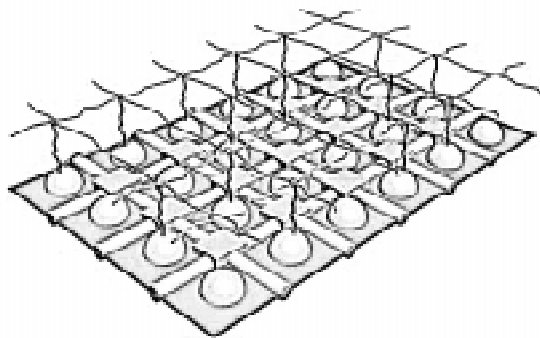


Рис. 2. Упорядоченная система нанокластеров ($p4$) с фиксированной на их поверхности решеткой из проводящих квантовых нанопроволок

Двумерная проводящая решетка, собранная из тонких проводящих квантовых нанопроволок, должна быть закреплена каждым своим узлом на одном нанокластере. Тогда каждый отдельный нанокластер может быть адресован пропусканием тока через две нанопроволоки, пересекающиеся на этом нанокластере. Адресация может осуществляться, например, соответствующим пропускаемому току магнитным полем, значение которого оказывается больше установленного порога срабатывания переключения состояния магнитного момента квантового бита. В свою очередь, проводящая нанорешетка может быть использована для считывания информации с квантового регистра, поскольку магнитное состояние нанокластера влияет на электрические свойства прикрепленной к нему пары нанопроволок. В качестве данных нанопроволок используются ДНК, обладающие необходимыми для этих целей геометрическими размерами.

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Биологические составляющие вычислительных устройств нового типа могут быть специальным образом функционализированы для сверхбыстрого решения определенного класса задач (например, проведения преобразования Фурье), используя структурные особенности ДНК, РНК и других биологических макромолекул. Таким образом, вычислительные устрой-

ства будут представлять собой комбинации квантовых регистров, используемых для проведения квантовых вычислений, и функционализированных модулей, ответственных за сверхбыстрое выполнение отдельных стандартных операций-подпрограмм. Другими словами, вычислительные устройства будут совмещать в себе преимущества «классических» квантовых и биологических (ДНК) компьютеров.

Для решения целого ряда задач шифрования, дешифрации, распознавания сигналов, изображений или речи необходимо проведение разложения исходных функций в ряды по набору взаимно ортогональных базисных функций (например, ряды Фурье). Биологические структуры позволяют моделировать набор базисных функций.

Одной из возможностей подобного моделирования является молекулярная сборка биологических нанопроволок со строго определенной последовательностью повторяющихся базовых (основных) элементов: в случае ДНК – нуклеотидов, в случае протеинов – аминокислот. Собранные контролируемым образом система нанопроволок закрепляется на поверхности нанокластеров. Исходная функция в форме электрического сигнала подается одновременно на всю систему базисных элементов. Имея разную структуру, отдельные базисные элементы по-разному преобразуют подаваемый сигнал. Процедура преобразования сигнала каждой отдельной нанопроволокой может быть математически описана как проекция исходной функции на определенную базисную. Преобразованный каждой из проволок сигнал считывается и обрабатывается с помощью алгоритмов, адаптированных для конкретной молекулярной сборки базисных биоэлементов.

НОВАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Основным (и наиболее спорным с современной точки зрения) понятием дискретной схемы машины Тьюринга является понятие «такт». Его глубоко противо-

речивый смысл был замечен еще древними греками. Одна из возможных эквивалентных его формулировок представляет собой знаменитый парадокс Зенона об Ахиллесе и черепахе. В рамках классической теории множеств он выступает в качестве неразрешимости проблемы континуума в аксиоматике Френкеля-Цермело.

Требуется обобщения и само понятие вычислимости. Понятие вычислимости предполагает требование найти приближение для рассматриваемого объекта с любой наперед заданной точностью в классе вычислимых объектов. Вычислимым объектом в смысле классической машины Тьюринга является множество конечных двоичных дробей. При этом происходит редукция сложности изучаемого объекта – например, иррациональные или трансцендентные числа заменяются существенно более простыми вычислимыми объектами – конечными двоичными дробями.

В предлагаемом в [23, 24] альтернативном подходе считается, что сложность вычислимого объекта должна быть эквивалентна сложности изучаемого реального объекта и адекватно отражать его свойства.

Объект считается (когнитивно) вычислимым, если он арифметически связан с присутствующим в памяти данного вычислительного устройства соответствующим вычислительным примитивом. Понятие вычислительного примитива рассматривается как базовое понятие при построении обобщенной модели машины Тьюринга.

Новая концепция принципиально отличается от классической включением «непрерывности» эволюции и переосмыслением понятий «лента» и «ячейка памяти». Если в классическом подходе ячейки памяти используются для хранения дискретной информации, и их изменение возможно только в тех случаях, когда указатель ленты показывает на нее, то в новой концепции «ячейка памяти» представляет собой постоянно функционирующую модель некой динамической системы (может быть, и достаточно сложной), а «лента» – некоторый «мостик» для задания или пе-

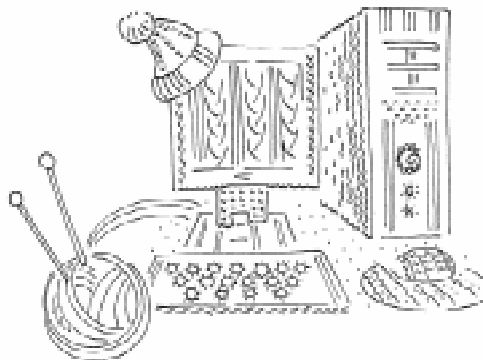
реопределения параметров эволюции состояния «ячейки». Очевидно, что классическая ячейка памяти для хранения «бита» является частным случаем такого обобщения.

В новой модели исключено понятие рабочей ячейки, то есть изменение состояния может зависеть от содержимого всей памяти в данный момент, а содержимое памяти может меняться одновременно на всем определенном пространстве. Осуществлено разделение описания процесса изменения состояния и памяти на две составляющие: программу P и эволюцию F . Такое разделение вызвано желанием отличать «принудительные» изменения, обычно вносимые в систему извне, задаваемые кем-то «осознанно», и те «естественные» процессы, которые происходят в определенной физической (или биологической) системе в силу законов природы.

С помощью новой модели можно реализовывать динамические системы, не описываемые детерминированными законами, а также стохастические гибридные системы, вероятностные автоматы, системы со стохастическим управлением и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые концепции процесса вычислений должны описывать если не все, то подавляющее большинство процессов, происходящих в реальном мире, а также работу всевозможных существующих и будущих вычислительных устройств, включая аналоговые и биокомпьютеры, нейрокомпьютеры, квантовые компьютеры и т. д.



Особенностью подходов, использующих концепцию обобщенной машины Тьюринга, является отказ от редукции сложности в процессе вычисления. Сложность вычисляемого объекта должна быть эквивалентна сложности вычисляемого. Таким образом, понятие вычислительной сложности правильнее рассматривать относительно выбранной системы базисных эволюционных примитивов, а не относительно традиционно рассматриваемых битовых преобразований $\{0, 1\}$.

Гибридные, квантовые и нейрокомпьютеры обещают существенным образом изменить представления о вычислительной мощности современных вычислительных устройств. Увеличение вычислительной мощности, возможное за счет использования новых моделей вычислений, основывающихся на физических явлениях, позволяет предположить, что в скором будущем новые компьютеры смогут решать задачи, невыполнимые для обычных компьютеров.

Литература

1. A.M. Turing. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem // Proceedings of the London Mathematical Society (2) 42 (1936) 230.
2. A. Church. A note on the Entscheidungsproblem // Journal of Symbolic Logic 1 (1936) 56.
3. J.B. Copeland. The Church-Turing Thesis // NeuroQuantology (2004) No. 2, 101.
4. H. Moore // Electronics. 38. 1965. 8. April 19.
5. R. Feynman. Modeling of physics on computers // International Journal of Theoretical Physics 21 (1982) 6/7.
6. D. Deutsch. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer // Proceedings of the Royal Society, Series A, 400 (1985) 97.
7. Терехов А.Н., Матиясевич Ю.В., Федотов Б.А. Унификация программного обеспечения микроЭВМ на базе виртуальной машины // Автоматика и телемеханика, № 5, М., 1990.
8. L.M.K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C.S. Yannoni, M.H. Sherwood, and I.L. Chuang. Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance // Nature 414 (2001) 883.
9. J.I. Cirac and P. Zoller. Quantum computations with cold trapped ions // Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 4091.
10. B.E. Kane. A silicon-based nuclear spin quantum computer // Nature 393 (1998) 133137.
11. J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, Lin Tian, C.H. van der Wai, and S. Lloyd. Josephson persistent current qubit // Science 285 (1999) 1036.
12. M. Bayer, P. Hawrylak, K. Hinzer, S. Fafard, M. Korkusinski, Z.R. Wasilewski, O. Stern, and A. Forchell. Coupling and entangling of quantum states in quantum dot molecules // Science 291 (2001) 451.
13. G. Ortner, M. Bayer, A. Larionov, V.B. Timofeev, A. Forchel, Y.B. Lyanda-Geller, T.L. Reinecke, P. Hawrylak, S. Fafard, and Z. Wasilewski. Fine structure of excitons in InAs/GaAs coupled quantum dots: A sensitive test of electronic coupling // Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 086404.
14. N.J. Cerf, C. Adami, and P.G. Kwiat. Optical simulation of quantum logic // Phys. Rev. A 57 (1998) R1477.
15. M. Soreni, S. Yagev, E. Kossoy, Y. Shoham, E. Keinan. Parallel biomolecular computation on surfaces with advanced finite automata // J. Am. Chem. Soc. 127 (2005) 3935.
16. D.V. Vyalikh, S. Danzenbaecher, M. Mertig, A. Kirchner, W. Pompe, Yu. S. Dedkov, and S.L. Molodtsov. Electronic structure of regular bacterial surface layers // Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 238103.
17. D.V. Vyalikh, A. Kirchner, S. Danzenbaecher, Yu. S. Dedkov, A. Kade, M. Mertig, and S.L. Molodtsov. Photoemission and NEXAFS studies of the bacterial surface protein layer of Bacillus sphaericus NCTC 9602 // J. Phys. Chem. B 109 (2005) 18620.
18. P. Shor. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer // SIAM J. Comput. 26 (1997) 1484.
19. U.B. Sleytr, P. Messner, D. Pum, and M. Sara. Crystalline bacterial cell surface proteins, Academic Press, San Diego (1996).
20. D. Pum and U. Sleytr. Large-scale reconstitution of crystalline bacterial surface-layer proteins at the air-water-interface and on lipid films // Thin Solid Films 244 (1994) 882.

21. *M. Mertig, R. Kirsch, W. Pompe, and E. Engelhardt.* Fabrication of highly oriented nanocluster arrays by biomolecular templating // *European Physical Journal D* 9 (1999)
22. *Граничин О.Н., Молодцов С.Л.* Создание гибридных сверхбыстрых компьютеров и системное программирование. СПб., 2006. 108 с.
23. *Владимирович А.Г., Граничин О.Н.* Обобщение концепции машины Тьюринга // Труды конф. УИТ-2005 2 2005. С. 90–98.
24. *Граничин О.Н., Жувикина И.А.* Новая модель процесса вычислений, основанная на эволюционных примитивах: обобщение концепции машины Тьюринга // *Нейрокомпьютеры* 2006, № 5, 6.

*Граничин Олег Николаевич,
доктор физико-математических
наук, профессор кафедры
Системного программирования
математико-механического
факультета СПбГУ,*

*Шалымов Дмитрий Сергеевич,
аспирант кафедры Системного
программирования математико-
механического факультета СПбГУ.*



**Наши авторы, 2007
Our authors, 2007**