

9. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – 2-е изд., перераб. и доп. в 2 – х томах. – М.: Мир, 1982. – 664 с.
10. Bergman, G. Weak localization in thin films / G. Bergman // Phys. Rev. B. – 1984. – Vol.107, № 1. – P. 1 – 58.
11. Adams, E. N. Quantum theory of transverse galvanomagnetic phenomena / E. N. Adams, T. D. Holstein // J. Phys. Chem. Sol. – 1959. – Vol. 10, № 4. – P. 254–276.
12. Изучение спин-зависимых процессов переноса электронов в магнитоупорядоченных средах / Головчук В.И., Лукашевич М.Г., Дятел А.Ю. // Акт о практическом использовании результатов исследования №2.4/130 от 27.05.2020.

ПРЕПОДАВАНИЕ СТУДЕНТАМ ВОПРОСОВ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРОВ

В. И. Попечиц

*НИИ прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Беларусь,
e-mail: Papechyts@bsu.by*

Рассмотрены вопросы преподавания студентам современных перспективных направлений развития компьютеров и систем искусственного интеллекта. Проанализированы достоинства и ожидаемые сложности создания оптических компьютеров, перспективы развития нанофотоники; нейрокомпьютеров, состоящих из большого числа параллельно работающих вычислительных элементов (нейронов) и перерабатывающих информацию на основе принципов работы естественных нейронных сетей; квантовых компьютеров, работающих на квантовом принципе суперпозиции отдельных квантовых состояний; молекулярных компьютеров, функционирующих на основе, так называемых «интеллектуальных» молекул и молекулярных систем; биокомпьютеров (ДНК-компьютеры и клеточные компьютеры), работающих на основе биологических компонентов как живой организм. Показаны возможности и недостатки разрабатываемых компьютеров нового типа по сравнению с существующими компьютерами, созданными на основе полупроводниковых, микро- и нанoeлектронных элементов.

Ключевые слова: современные компьютеры; оптические компьютеры; нейрокомпьютеры; квантовые компьютеры; молекулярные компьютеры; биокомпьютеры.

TEACHING STUDENTS QUESTIONS PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF COMPUTERS

V. I. Papechits

*A. N. Sevchenko Research Institute of applied physical problems
of the Belarusian state University, Kurchatov street, 7, 220045, Minsk, Belarus,
Corresponding author: V. I. Papechyts (Papechyts@bsu.by)*

The article deals with the issues of teaching students modern promising directions for the development of computers and artificial intelligence systems. The advantages and ex-

pected difficulties of creating optical computers, the prospects for the development of nanophotonics are analyzed; neurocomputers, consisting of a large number of parallel computing elements (neurons) and processing information based on the principles of natural neural networks; quantum computers, operating on the quantum principle of superposition of individual quantum states; molecular computers, operating on the basis of the so-called "intelligent" molecules and molecular systems; biocomputers (DNA computers and cell computers), working on the basis of biological components like a living organism. The possibilities and disadvantages of the developed computers of a new type are shown in comparison with existing computers, based on semiconductor, micro- and nanoelectronic elements.

Key words: modern computers; optical computers; neurocomputers; quantum computers; molecular computers; biocomputers.

Развитие науки, техники, производства происходит при постоянно увеличивающемся росте потока информации. Создание компьютеров на основе полупроводниковых, микро- и нанoeлектронных элементов обеспечило значительный прогресс в области получения, хранения, обработки и передачи информации. Однако современные компьютеры по своим возможностям не всегда позволяют решать многие сложные задачи, требующие переработки огромных объемов исходной информации в масштабе реального времени. В настоящее время электронные технологии приближаются к теоретическому пределу своих возможностей, что вызывается квантово-механическими эффектами (размер транзистора не может быть меньше нескольких нанометров), физическими пределами скорости распространения электрических сигналов по чипу, термодинамическими эффектами и др.

Для решения данной проблемы необходимо привлекать новые технологии, например, создавать оптические компьютеры – функционирование которых основано на использовании оптических элементов (узлов, устройств) и волоконной оптики, что позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с электронными компьютерами: частота оптического излучения (ближний инфракрасный диапазон, видимый, ближний ультрафиолетовый) составляет 10^{12} – 10^{16} Гц (это дает возможность создать до ста тысяч информационных каналов со спектральной шириной 100 ГГц); передача оптических сигналов происходит со скоростью света ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), что в 20–30 раз больше скорости распространения электрического импульса по чипу, определяемой временем перезарядки цепи; так как у фотонов в отличие от электронов нет электрического заряда большое число световых пучков может проходить по одной области пространства и не влиять друг на друга; использование двумерного и трехмерного (голограммы) характера световых полей позволяет значительно увеличить плотность и скорость передачи информации; два состояния поляризации света вдвое увеличивают объем передаваемой информации; оптическая система не чувствительна к электромагнитным и электростатическим помехам, не излучает во внешнюю среду, что обеспечивает защиту от искажения и перехвата информации.

Вместе с тем, современные цифровые компьютеры имеют ряд преимуществ по сравнению с оптическими, например, более высокая точность выполнения операций; возможность программирования решаемых задач, гибкость в работе. Поэтому целесообразно совместно применять в вычислительной технике микроэлектронные и оптические технологии, т.е. оптоэлектронные системы обработки информации, в которых с

помощью оптоэлектронных элементов оптическая информация может преобразовываться в цифровую и наоборот.

В последние годы проводятся работы по созданию оптических процессоров нечеткой логики, которым придается большое значение при разработке систем искусственного интеллекта, а также для решения задач контроля и управления. Рассматривается проблема интеграции в одной модели двух форм мышления: логического и образного. В этом плане наиболее перспективными являются голографические технологии, так как обработка изображений это и есть обработка образов, а в реализации логических операций оптическими методами уже имеется большой прогресс. Представляет интерес также квантовая голография, которая позволит реализовать идею квантовых вычислений.

Весьма перспективным направлением оптики наноразмерных структур представляется нанофотоника – область оптики, основной задачей которой является создание фотонных чипов размеров не более нескольких микрон, т.е. оптических аналогов электронных микрочипов. Оптические микрочипы будут иметь размеры на 2–3 порядка меньше электронных, а быстродействие, соответственно, на 2 порядка выше. Нанофотоника требует решения ряда теоретических вопросов и позволит в перспективе развить элементную базу оптических компьютеров (оптические ключи, оптические транзисторы, устройства для сбора, хранения и распределения информации).

В последние годы наблюдается определенный прогресс в создании компонентов для оптических компьютеров, например, рассматривается возможность применения так называемых метаматериалов, обладающих рядом необычных свойств. Таким образом, новые оптические технологии с учетом достижений нанофотоники являются весьма перспективными для создания элементной базы будущих оптических компьютеров и компьютерных систем.

Интерес к разработке и созданию нейрокомпьютеров связан с возникновением потребности в более мощных и гибких вычислительных системах, необходимых для решения многих сложных практически важных проблем, например, для моделирования процессов в глобальных экосистемах, что нужно для составления прогнозов погоды и предсказания стихийных бедствий; для решения задач нейрофизиологии и других областей медицины; для решения проблем искусственного интеллекта; для моделирования космологических процессов и т.п. Эти проблемы сегодня довольно сложны для современных компьютеров и даже суперкомпьютеров. Нейрокомпьютер – это компьютер, предназначенный для проведения нейровычислений путем воспроизведения информационных процессов, подобно протекающим в нейронных сетях мозга, т.е. компьютер, состоящий из большого числа параллельно работающих вычислительных элементов (нейронов) и перерабатывающий информацию на основе принципов работы естественных нейронных сетей.

Главной структурной единицей нейрокомпьютера является специфический процессор (нейропроцессор), имитирующий информационное функционирование отдельных нервных клеток – нейронов. Нейрон способен воспринимать, преобразовывать и передавать на другие нейроны нервное возбуждение в виде нервных импульсов. Нервная система человека и животных состоит из клеток-нейронов, сгруппированных в нейронные ансамбли и сети, т.е. представляет информационно-управляющую систему, которая с помощью рецепторов воспринимает информацию о внешней и внутренней среде, обрабатывает ее с помощью генетической программы и индивидуального опыта и формирует управляющие воздействия на исполнительные системы организма. Ней-

роны бывают трех видов: сенсорные (рецепторные) нейроны, которые воспринимают энергетические воздействия (световые, акустические, тактильные и т.п.), преобразуют их в импульсные сигналы и передают интернейронам; вставочные (интернейроны) осуществляют обработку поступившей информации с передачей результатов обработки информации мотонейронам; исполнительные (мотонейроны) передают команды на исполнительные системы организма (мышцы, сосуды и т.п.). Следует обратить внимание на грандиозную сложность нейронных сетей у высокоразвитых животных и человека. Мозг человека содержит примерно 10^{11} нейронов, количество связей между которыми 10^{14} .

В нейрокомпьютерах нейропроцессоры соединяются друг с другом, образуя имитирующие нейронные сети мозга нейроподобные структуры. Конфигурации искусственных нейронных сетей позволяют воспроизвести в компьютере самообучение, самопрограммирование и другие свойства, присущие живым организмам.

В настоящее время в нейробиологии широко применяется метод биологического моделирования, в котором сложный для изучения объект заменяется более простым, но эквивалентным исходному по сути исследуемых явлений. Затем результаты экспериментов на простых организмах (черви, моллюски, кальмары и т.п.) используются в качестве гипотез для построения адекватных кибернетических моделей мозга. Такой метод моделирования позволяет строить кибернетические модели информационных процессов в мозге животных и человека и получать экспериментальные данные о структуре и функциях мозга, механизмах его саморегуляции, самоорганизации и самопрограммирования, которые необходимы для построения нейрокомпьютеров.

Для построения цифровых динамических нейронов применяются методы синтеза цифровых моделей на базе интегрирующих структур, состоящих из параллельно функционирующих решающих блоков, реализующих операции суммирования, численного интегрирования, экстраполяции выходных приращений и снабженных коммутационными элементами. Цифровая модель нейрона, построенная на основе цифровых интеграторов и реализующая разностный алгоритм с переменными параметрами, представляет собой процессорный элемент, пригодный для использования в нейрофизиологических исследованиях и для решения сложных задач вычислительной математики, робототехники и искусственного интеллекта.

В настоящее время разработка нейрокомпьютеров ведется в большинстве промышленно развитых стран на основе различных подходов к проектированию искусственных нейронов и нейронных сетей и на новой технологической базе, оптической, оптоэлектронной и молекулярной.

Идея о возможности проведения квантовых вычислений была высказана российским математиком Ю. И. Маниным в 1980 г. Первая модель квантового компьютера, т.е. компьютера, работающего на основе законов квантовой механики и квантовой логики была предложена американским физиком Р. Фейнманом в 1981 г. Концепция квантового процессора и квантовых логических вентилях была представлена британским физиком Д. Дойчем в 1989 г.

Основная ячейка квантового компьютера – квантовый бит или кубит имеет два базовых состояния: 0 и 1. Двум состояниям кубита могут соответствовать, например, основное и возбужденное состояние атома, направления, условно, вверх и вниз спина (собственный момент импульса) атомного ядра, направления тока в сверхпроводящем кольце, направления спина электрона и т.п. Квантовая природа кубита заключается в принципе

суперпозиции, согласно которому кубит находится одновременно в обоих своих состояниях. Система из n кубитов будет иметь 2^n классических состояний, каждое из которых может быть измерено с вероятностью 0–100%. Одна операция над группой кубитов затрагивает все значения, которые она может принимать и отличие от классического бита, что обеспечивает параллелизм вычислений. Если обычный бит – это классическая система, у которой есть только два состояния (0 и 1), то кубит – это квантовая система с двумя возможными основными базовыми состояниями и состоянием суперпозиции. Математически кубит – это двумерное комплексное пространство, в котором можно выполнять унитарные преобразования состояний системы, т.е. согласно принципу суперпозиции можно складывать, вычитать состояния и умножать их на комплексные числа. Эти состояния образуют фазовые пространства, эволюция системы в которых описывается унитарными преобразованиями фазового пространства.

Квантовый компьютер с памятью, измеряемой в килобитах, в некоторых задачах будет работать значительно быстрее, чем классический суперкомпьютер с терабайтами памяти. Квантовые компьютеры – это новый решающий этап в развитии вычислительных систем.

Работу квантового компьютера в общем виде можно представить как последовательность трех операций: запись (подготовка) начального состояния; вычисление (унитарное преобразование начального состояния); вывод результатов (измерение конечного состояния).

Для создания квантового компьютера необходимо создать масштабируемые физические системы с определенным числом кубитов (по проведенным оценкам считается, что квантовый компьютер, содержащий один квантовый килобит, обеспечит вычисления, недоступные никакому современному классическому компьютеру); необходимо обеспечить возможность установки начальных условий и изменения их в зависимости от решаемой задачи, т.е. возможность инициализации регистра кубитов в виде простого квантового состояния; необходим универсальный набор квантовых вентилях; должна быть возможность измерения состояний отдельных кубитов на выходе квантового алгоритма с высокой точностью и надежностью. Степень изоляции квантовой системы от внешней среды должна быть очень высокой.

Квантовый компьютер оперирует состояниями, роль соединений и ячеек памяти играют кубиты, а роль логических вентилях, на которые разбивается весь процесс вычислений, – унитарные преобразования. Кубиты представляются когерентными волновыми функциями. Унитарные преобразования, воздействуя на квантовую систему, не нарушают записанную в кубит информацию и когерентность волновых функций кубитов.

Кроме описанной стандартной концепции квантовых вычислений на основе универсального набора квантовых логических вентилях существуют и другие подходы (квантовые компьютеры на ядерном магнитном резонансе, на ионах в ловушках и др.).

В настоящее время построены только весьма ограниченные варианты квантовых компьютеров (в пределах 512 кубитов).

Молекулярный компьютер – это компьютер, работающий на основе молекул и молекулярных ансамблей. В молекулярных компьютерах вместо кремниевых чипов, используемых в современных компьютерах, применяются так называемые интеллектуальные молекулы, которые могут существовать в двух термодинамических устойчивых состояниях, каждому из которых присущи свои физические и химические свойства. При этом можно переключать молекулу из одного состояния в другое при помощи све-

та, тепла, электрического и магнитного полей, химических агентов и т.д. Такие переключаемые бистабильные молекулы представляют собой двухбитовую систему, воспроизводящую на молекулярном уровне функцию классического транзистора. Например, после изомеризации в бистабильной молекуле образуется единая электронная система, способная проводить электрический ток. Могут изменяться и другие свойства молекулы.

Архитектура классического компьютера включает три основных элемента: переключатели, память, соединяющие провода. В молекулярных компьютерах роль переключателей играют бистабильные молекулы, управляемые световыми и электрическими импульсами или электрохимическими реакциями. Память молекулярного компьютера основана на бистабильных молекулярных структурах и их превращениях. Для обеспечения длительного хранения записанной информации требуются системы с большим временем жизни изомера. В настоящее время информация записывается на поверхности активной среды, но уже разрабатываются способы записи оптической информации в полном объеме среды (трехмерная память), что позволит увеличить плотность записи информации на четыре порядка. Для записи информации в объеме активной среды используется двухфотонное поглощение света, а для считывания – флуоресценция. Уже созданы трехмерные (многослойные) флуоресцентные диски FMD-ROM, которые вмещают на десяти слоях 12-сантиметрового диска до 140 гигабайт информации. Связь между молекулярными переключателями и молекулярной памятью в молекулярных компьютерах обеспечивают молекулярные проводники: проводящие полимеры (допированный полиацетилен, политиофен, полианилин и др.); органические проводники, представляющие собой длинные сопряженные молекулы, в которых электрон переносится по цепи π -связей; нанотрубки с однослойными или многослойными стенками, при заполнении которых металлами получают проводники, состоящие из цепочек атомов металлов.

Собрать молекулярные транзисторы, память и проводники в единый работающий молекулярный компьютер сложная и пока не решенная задача, но путь ее решения понятен – это принцип молекулярного распознавания, лежащий в основе происхождения жизни (его использует природа для создания таких сложных молекулярных структур, как двойная спираль ДНК, мембраны и глобулярные протеины). В настоящее время уже предложены молекулярные устройства, в которых все функции компонентов компьютера обеспечиваются фотонами вместо передвижения электронов в сложных молекулах. По оценкам специалистов молекулярные компьютеры могут быть созданы в ближайшие годы.

Компьютер, функционирующий на основе биологических компонентов как живой организм, называется биокомпьютером, т.е. это гибрид информационных и молекулярных технологий и биохимии. Вычислительными элементами биокомпьютера являются белки и нуклеиновые кислоты. Разрабатываются два типа биокомпьютеров: ДНК-компьютеры и клеточные компьютеры.

Предпринимаются попытки использовать молекулы ДНК для хранения и обработки информации в биокомпьютерах. ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота) это биополимер, состоящий из четырех элементарных единиц, так называемых нуклеотидов, которые включают в себя азотистые основания: *A* (аденин), *G* (гуанин), *C* (цитозин), *T* (тимин); сахара (дезоксирибозы) и фосфаты.

В живых клетках генетическая информация закодирована в образующей двойную спираль молекуле ДНК. Зная строение одной из цепей ДНК, всегда можно восстановить строение другой цепи, так как азотистое основание *A* может соединяться водородными связями только с основанием *T* другой цепи, а азотистое основание *G* – только с основанием *C*. Это свойство молекулы ДНК называется комплементарным, благодаря которому генетическая информация может копироваться и передаваться от материнских клеток к дочерним. Геном человека насчитывает примерно 3 миллиарда нуклеотидов, кодирующих 35–40 тысяч генов. В живой клетке наряду с молекулами ДНК существуют также молекулы рибонуклеиновой кислоты (РНК), которые создаются специальным ферментом на основе одной из цепей ДНК. Молекулы РНК участвуют в синтезе белков – полимеров, состоящих из аминокислот.

Первая (пластмассовая) модель биокомпьютера была создана группой ученых из Вейцмановского института естественных наук (Израиль) в 1999 г. В 2001 г. эта группа ученых реализовала данную модель в реальном биокомпьютере, состоящем из молекул ДНК, РНК и молекул специальных ферментов, которые играли роль аппаратного обеспечения. Молекулы ДНК выполняли функцию программного обеспечения. Пока этот биокомпьютер способен решать лишь самые простые задачи. В 2002 г. фирма Olympus Optical разработала имеющую молекулярную и электронную составляющие коммерческую версию ДНК-компьютера, которая предназначалась для генетического анализа. Технология генетического анализа на основе ДНК-компьютера может найти применение в биологии и медицине, в частности для мониторинга состояния здоровья человека и синтеза нужных лекарств.

В 2001 г. американские биологи создали трансгенные микроорганизмы, т.е. микроорганизмы с искусственно измененными генами. Клетки трансгенных микроорганизмов способны выполнять логические операции И и ИЛИ. В настоящее время на базе этих клеток ученые пытаются создать более сложные логические элементы, а также структуры, выполняющие параллельно несколько логических операций.

В 1995 г. была определена последовательность нуклеотидов в геноме бактерии, в 1997 г. был секвенирован геном дрожжей. В 2001 г. было практически завершено секвенирование генома человека. Биоинформатика позволяет выполнять статистический анализ последовательностей ДНК, распознавать геном в последовательности ДНК, находить регуляторные сигналы, предсказывать функции белков, анализировать пространственную структуру белков и нуклеиновых кислот и т.д.

Прогресс в области компьютерной индустрии позволил создать технологии получения экспериментальной информации о работе большого числа генов в клетке и развить методы обработки этой биоинформации, т.е. возникла индустриальная молекулярная биология, в которой применение новейших вычислительных устройств играет определяющую роль.

В 1990-х гг. начала развиваться технология создания биочипов. Приготовление биочипов осуществляется с помощью роботов, которые применяются для создания микросхем. Робот наносит на подложку фрагменты ДНК. Многие фирмы делают биочипы на заказ.

В настоящее время в большинстве промышленно развитых стран активно ведутся основанные на различных биологических, биофизических и биохимических процессах разработки ДНК- и клеточных компьютеров.