**Компьютер со скоростью света**

**Чем компьютер отличается от черной дыры? Звучит как шутка от Microsoft, но это один из самых серьезных вопросов современной физики. Для большинства людей компьютеры — это красивые коробки на столе или чипы размером с ноготь, вмонтированные в современную аппаратуру. Но для специалиста все физические системы — компьютеры. Камни, атомные бомбы и галактики не могут работать под управлением операционных систем, но они регистрируют и обрабатывают информацию. Электроны, фотоны и другие элементарные частицы несут в себе информацию, которая изменяется каждый раз, когда частицы взаимодействуют друг с другом. Физическое существование и информационное содержание неразрывно связаны. Как сказал ученый Джон Уил-лер из Принстонского университета, <все из бита>.**

**А в чем проблема?**

Первые компьютеры создавались как устройства для вычислений, грубо говоря, как усовершенствованные арифмометры. Сейчас компьютеры превратились в универсальные средства обработки, хранения информации и обмена ею. С их помощью печатают книги, снимают кино, пишут музыку, управляют заводами и космическими станциями. Потребности человечества в вычислительных мощностях постоянно растут.

С конца прошлого тысячелетия микропроцессоры развиваются быстрее остальных компонентов компьютера. Современные процессоры обрабатывают команды на частотах около 4 ГГц, а простые арифметические операции выполняются вдвое быстрее. Однако проводящие дорожки материнской платы, связывающие процессор с памятью и другими составляющими компьютера, едва справляются с частотами 1 ГГц. В результате 75% рабочего времени центральный процессор простаивает в ожидании инструкций и данных от периферийных устройств.

Антони Леви, работающий в Университете Южной Калифорнии, пришел к неутешительному выводу: в ближайшее время разрыв между быстродействием процессора и скоростью доступа к данным из памяти достигнет критической точки. Например, при увеличении тактовой частоты на 2 ГГц сигнал, проходящий по медным проводникам на материнской плате, ослабляется более чем в 10 раз. И это не все неприятности — растут потребление мощности, электромагнитные помехи и выделение тепла. Данные факторы являются основными проблемами при увеличении быстродействия компьютера в целом. Чтобы уменьшить или хоть как-то нивелировать разрыв в быстродействии, необходимо, чтобы частота обмена росла на 1 ГГц ежегодно.

В CD- и DVD-устройствах, мониторах, мышках, видеокамерах и оптоволоконных сетяхуже давно применяется технология перевода данных из оптической формы в электронную и обратно. Однако в настоящее время ядро компьютера — процессор, оперативная память и системная плата, которая соединяет их между собой и с периферийными устройствами, остаются чисто электронными, построенными на стандартной кремниевой технологии и медных проводниках.

Специалисты фирмы Intel надеются увеличить быстродействие проводных соединений до 20 Гц, но этой частоты вряд ли хватит для обслуживания микросхем, изготовленных по 32-нанометровой технологии. Все идет к тому, что медные проводники придется заменить оптическими. Ведь если использовать для передачи сигналов не электрический ток, а свет, то есть надежда достичь тактовых частот порядка 1000 ГГц. Однако существует ряд проблем, связанных с физическими свойствами самого оптического волокна. Одним из главных препятствий на пути создания такого микрочипа является невозможность изгибать траектории лучей света на большие углы на малых расстояниях.

Ведь если заменить провода в современных чипах световодами, то в устройстве размером со спичечный коробок оптоволокно придется изгибать миллионы раз, и углы изгиба должны быть большими — до 90 градусов. Но при этом совершенно нарушаются условия полного внутреннего отражения света, на которых и построен принцип функционирования оптоволокна. Еще одна проблема — стыковка сигналов двух типов: оптического, поступающего по световоду, и электрического, который необходим для обработки на кремниевых кристаллах. Есть и сугубо экономическое препятствие: оптические соединения обладают гораздо более высокой пропускной способностью, однако стоят намного (в 10-100 раз) дороже. Но при передаче миллионов сообщений по Интернету пропускная способность важнее финансовых затрат. Поэтому на больших расстояниях ис-пользуются преимущественно оптоволоконные линии. Например, компания Cisco потратила $500 млн. на разработку маршрутизатора с пропускной способностью 40 Гбит)сек.

Эти проблемы ставят перед разработчиками компьютерных технологий ряд задач, решение которых позволит перейти на качественно более высокий уровень производительности. Основная элементная база для нового поколения вычислительных машин уже разработана, хотя во многом пока только в теоретическом или экспериментальном виде. E вый принцип построения компьютеров лев в плоскости создания так называемого молекулярного процессора.

Данную тему ученые разрабатывают давно. Ею занимаются в США, Германии, Росс Израиле и, несмотря на то, что перспектива выпуска серийного компьютера на молекулах все еще кажется достаточно отдаленной, некоторые успехи есть. Специалисты уверены, что молекулярные компьютеры придут на смену кремниевым уже через 20-25 лет. А еще через 10-20 лет будет создано но) поколение более эффективных квантовых и ДНК-компьютеров.

Что же это такое — молекулярный компьютер? Устройство, в котором вместо кремниевых транзисторов, применяемых сейчас в процессорах, работают молекулы и молекулярные группы. В основе новой технологической зры лежат так называемые интеллектуальные молекулы (или группы молекул). Они могут существовать в двух устойчивых состояниях каждое из которых имеет свои физически химические свойства. Переводить молекулу из одного состояния в другое (переключать) можно с помощью света, тепла, химически агентов, электрического и магнитного поля и т.д. Фактически переключаемые бистабильные-молекулы — это двухбитовая система, воспроизводящая на молекулярном уровне функцию классического транзистора. Особенно интересны такие превращения бистабильных молекул, после которых сильно меняется электронная конфигурация. Например, в молекуле образуется единая сопряженная электронная система следовательно, появляется способность про водить электрический ток. Могут изменяться также спектры поглощения, возникать нелинейные оптические свойства и, что особ но ценно, флуоресценция. Еще в 1959 г. американский физик Ричард Фейнман отметил, что молекулы, обладающие определенными свойствами, смогут функционировать как переключатели и заменить собой транзисторы. А прогресс позволит работать с отдельны атомами и молекулами.

Поскольку производительность компьютера пропорциональна количеству транзисторов, размещаемых на единице площади, то выигрыш в производительности будет огромным. Так, если уменьшить размер транзистора молекулярных размеров (примерно до 1 нм) то на единице площади интегральной схемы поместится в миллион раз больше транзисторов . Если к тому же время отклика уменьшится до фемтосекунд (на шесть порядков) — а именно таково время протекания элелементарной стадии химической реакции, — то эффективность молекулярного компьютера может оказаться в 100 млрд. раз выше, чем современного кремниевого.

Принципиально любая вычислительная система состоит из нескольких элементарных единиц: переключателей, проводников, запоминающих элементов. Чтобы разобраться, как эти элементы могут работать на молекулярном уровне, рассмотрим каждый из них, сравнив с классическим кремниевым транзистором.

**Кремний плюс транзистор**

Интерес к созданию молекулярных компьютеров неслучаен. На процессорном чипе современного компьютера расположены сотни миллионов транзисторов, и намного больше разместить уже вряд ли удастся — технологии их производства доведены до совершенства. Транзистор — это два электрода на кремниевой подложке, ток между которыми регулируется потенциалом, подаваемым на третий, управляющий, электрод — затвор. Критическим параметром кремниевого транзистора является толщина изолирующего слоя оксида кремния между затвором и проводящим слоем. Современные технологии уже позволяют сделать его толщиной 0,09 микрон (90 нм), что соответствует примерно 1/1000 толщины человече-ского волоса. Несмотря на то, что технологии производства изолирующего слоя совершенствуются, и он становится тоньше, существует физический предел — не менее 4-5 молекул (1,5-2 нм). В более тонких слоях начинаются неконтролируемые туннельные процессы и перегрев, которые нарушают работу транзисторов и вычислительной системы в целом. Само формирование интегральной схемы с меньшими размерами транзисторов невозможно на базе стандартной техники. В силу квантовых законов травление нельзя осуществить на меньшем масштабе, чем длина полуволны света, а уже сейчас используют коротковолновое ультрафиолетовое излучение. Так что предел уже достигнут.

**Переключение с помощью молекул**

Наиболее эффективные молекулярные переключатели основаны на фоточувствительных соединениях, которые в результате различных физико-химических процессов при воз-действии квантов света переходят в другое стабильное состояние. После переключения кардинально перестраивается электронная конфигурация системы, а ее геометрические параметры остаются практически прежними. Перспективны также топологические изомеры супрамолекул. Например, переключатель, описанный Д. Ф. Стоддардом и Д. Хисом, которые сотрудничают с фирмой Hewlett Packard. Молекулярный слой толщиной в одну молекулу помещают между металлическим и кремниевым электродами. После электрохимического окисления на одной из частей молекулы появляется дополнительный положительный заряд. Поскольку в исходной форме эта часть соседствует с одноименным зарядом, то после окисления плюсы отталкиваются и молекула перегруппировывается. Образуется вторая стабильная форма, и меняется электрическое сопротивление. Главное достоинство такого переключателя — его исключительно высокая устойчивость. Цикл окисления-восстановления такой системы может совершаться огромное количество раз без заметного разрушения самой супрамолекулярной структуры.

**А теперь о памяти**

В настоящее время применяют магнитные оптические носители памяти, которые основаны на принципе двумерной записи, что ограничивает объемы записываемой информации. Теоретическая плотность оптической записи информации обратно пропорциональна квадрату длины волны используемого для записи света. Поэтому предел возможностей однослойного компакт-диска равен 3,5х108 бит/ с (для света с длиной волны 532 нм). Память молекулярного компьютера будет основана на тех же принципах, что и переклю чатели. В ее основе — молекулярные структуры, которые могут существовать в двух стабильных состояниях. Конечно, для различных типов памяти потребуются различные характеристики этих превращений, а чтобы обеспечить долшгое хранение записанной информации будут нужны системы с большим временем жизни молекулы-изомера. Ученые предположили уже разработали систему памяти для молекулярных компьютеров. В ней можно записывать оптическую информацию не только . поверхности активной среды, как это делается в настоящее время в серийно выпускаемых устройствах, а в полном объеме, т. е. память станет трехмерной. Если использовать ве объем диска, то плотность записи на трехмерном носителе с тем же источником света будет уже 6,5х1012 бит/см', или на четыре порядка больше. А при использовании более жестко излучения объем записываемой информации увеличивается еще в 10 раз. Чтобы записать информацию в объеме образца или, по крайней мере, на нескольких его слоях, нужна новая система записи. Для этого используют метод поглощения двух фотонов. Суть его в том, что необходимая для записи энергия доставляется двумя фокусируемыми в нужной точке лазерными пучками. Впервые принципиальную возможность такой схемы показал П. Ренцепис из Калифорнийского университета в конце 1980-х годов. Он использовал, в частности, фоточувствительную молекулярную систему. Поглотив два фотона, молекула А перегруппируется в окрашенную форму В. Считывание записанной таким образом информации происходит при регистрации флуоресценции молекулы В, которая также инициируется лазерным светом. Флуоресценция — не единственный, но самый привлекательный метод считывания записанной информации, поскольку обладает наибольшей чувствительностью.

Американская компания Constellation SD объявила о создании первого трехмерного (многослойного) флуоресцентного диска FMD-ROM. По утверждению фирмы, первые образцы вмещают на десяти слоях 12-сантиметрового диска до 140 Гбайт (5-7 Гбайт — на диске размером с кредитную карту). Причем компания располагает технологией, позволяющей в 10 раз увеличить число слоев и, соответственно, плотность записываемой информации. Другой перспективный подход к созданию молекулярной памяти продемонстрировали недавно М. Рид из Йельского университета и Д. Тур из компании Hewlett Packard. Они сделали «сандвич» примерно из 1000 молекул и поместили его между золотыми электродами. При определенном напряжении, поданном на электроды, это образование удерживает электроны, т. е. хранит данное состояние в памяти в течение примерно 10 мин. (стандартная кремниевая динамическая память DRAM удерживает всего на миллисекунды).

**Как работают молекулярные провода**

Наконец, третий компонент молекулярных компьютеров — проводники, обеспечивающие сообщение между молекулярными транзисторами и молекулярными устройствами памяти. Разработку проводников, также имеющих наноскопические размеры, ученые ведут по трем основным направлениям. Первое — это проводящие полимеры: полиацетилен (Нобелевская премия 2000 г.), политиофен, полианилин и др. Второе — различные органические проводники, обладающие достаточно высокой проводимостью. Все они представляют собой длинные сопряженные молекулы, в которых электрон переносится по цепи внутримолекулярных связей.

В 1998 г. западные информационные агентства сообщили, что в Sandia National Laboratories, принадлежащей американскому департаменту энергетики, разработана новая светоизгибающая (light bending) технология, которая в недалеком будущем найдет применение в телекоммуникационных сетях. Микроскопическая трехмерная структура (фотонная решетка) создана на основе кремния и позволяет передавать когерентный свет в оптическом диапазоне длин волн с минимальными потерями. Эффективность передачи составляет 95%, что значительно превосходит показатель стандартной светопередающей среды (около 30%), используемой в настоящее время. При этом можно направлять лучи по сложной траектории с изгибами практически под прямым углом в заданную точку. Фотонная решетка представляет собой пачку тонких кремниевых двухмерных дифракционных решеток, каждый слой которой повернут на 90 градусов относительно соседнего. Для создания работающей фотонной решетки достаточно 10 такихслоев. При взгляде через микроскоп фотонная решетка похожа на поленья, сложенные колодцем. Она обладает уникальной способностью изгибать траекторию световых волн определенной частоты практически в любом направлении и почти без потерь. Это изобретение может способствовать существенному прогрессу в области телекоммуникаций и оптических компьютеров.

Главное достижение лаборатории Sandia — технологический прорыв в область нанометровых трехмерных структур. Об открытии было объявлено 16 июля 1998 г. Оно запатентовано, уже есть предложения от крупных промышленников, готовых организовать коммерческое производство. Современные решетки, созданные Ш. Лином и Дж. Флеммингом, успешно работают в инфракрасном диапазоне (длины волн около 10 мк). Мало того, исследователи не останавливаются на достигнутом и делают решетку для волн длиной 1,5 мк — именно в этом диапазоне сегодня передается информация по волоконно-оптическим кабелям.

Особые надежды возлагаются на третий тип проводников — нанотрубки. Это великолепный материал для молекулярной электроники. Нанотрубки с однослойными или многослойными стенками получаются при прохождении электрического разряда между двумя графитовыми электродами. Длина одностенных нанотрубок может достигать микрометров (диаметр около 1 нм), причем на отрезках по 150 нм сохраняются свойства металла. Углеродные или боразотные нанотрубки можно заполнять металлами и таким образом получать одномерные проводники, состоящие из цепочек атомов металлов. С одностенными нанотрубками удается делать еще более интересные вещи. При определенном напряжении можно переключать состояние одностенной нанотрубки из проводимого в непроводимое, перемещая всего один электрон. Фактически это прототип транзистора на одном электроне.

Вот в общих чертах то, что ждет нас в обозримом будущем. Это не значит, что существующее поколение кремниевых компьютеров полностью и сразу отомрет. Просто параллельно с ним появится более мощная генерация.

**Собрать и организовать**

Самая сложная задача — собрать все компоненты в работающее устройство. До ее решения еще далеко. Однако путь, по которому нужно идти, вполне ясен: это принцип молекулярно распознавания, ответственного за самосборку и самоорганизацию сложных ансамблей и агрегатов молекул. Этот принцип лежит в основе происхождения жизни, и именно его и пользует природа для создания таких сложных структур, как двойная спираль ДНК, жидкие мембраны и белки. Пока эта задача не решена, ученые предполагают делать гибридные устройства, сочетающие достоинства молекулярного подхода с наиболее успешными технологическими вариантами, найденными для кремниевых технологий.

Но мысль ученых идет еще дальше. До сих ш мы рассматривали примеры, когда все функции компонентов компьютера обеспечиваются передвижением электронов в сложных молекулярных ансамблях. Между тем эти функции могут взять на себя и фотоны. Уже предлож ены различные варианты фотонных устройств, например, молекулярный фотонный транзистор. В нем фрагмент молекулы, поглощающий а, квант света, играет роль стокового электрод следующая часть молекулы — это проводник. последний излучающий фрагмент соответствует электроду истока. В компьютерах на подобных транзисторах регулирование всей его р, боты будет осуществляться с помощью свет; Что же потом? Спинтроника и компьютеры на квантовых точках, ДНК-компьютер. В квантовом компьютере в качестве битов выступают квантовые объекты, например спин электронов или ядер. Такой компьютер cтанет еще одним шагом вперед по сравнению с молекулярным. В квантовом компьютере вместо значений 0 или 1, как у классического бит будет квантовый бит (кубит). Кубит может принимать несколько различных значений нормированных комбинаций двух основных состояний спина, что дает большое число сочетаний. Так, 32 кубита могут образовать окот 4 млрд. состояний, а при наборе из 300 кубитов квантовый компьютер в принципе способен найти 2"' возможных решений — это число примерно равно числу всех элементарных частиц во Вселенной. И уже разработаны алгоритмы для квантовых компьютеров!!!

**Виталий Власенко**