

Квантовые транзисторы, нанооптика ...

Материал из МЕМ Wiki.

Содержание

- [1 Введение](#)
- [2 Квантовый размер](#)
- [3 Квантовые транзисторы](#)
- [4 Одноэлектроника](#)
- [5 Нанооптика](#)
- [6 Квантовые биты](#)
- [7 Телепортация и все такое](#)

Введение



От тех машин родились машины разумные, которые измыслили машины совершенные, ибо как атом, так и Галактика суть машины, и нет ничего, кроме машины, ее же царствию не будет конца.

Станислав Лем. «Сказки роботов»

Транзистор — это простейшая машина, используемая в современном компьютере для переключения битов. Без реализуемой с его помощью операции инвертирования невозможно построение базисной логической функции — основы цифрового мироздания. В старое доброе время люди, объясняя принцип действия транзистора, называли его по инерции электронным реле и даже сравнивали с водопроводным краном. В наше время — наоборот, пытаясь объяснить работу новых элементов, говорят: транзистор оптический, молекулярный или квантовый. Вот уж, действительно, понять — значит привыкнуть и научиться пользоваться! В конце XX века информационные технологии вплотную приблизились к возможности реализации радикальных идей квантовой физики. Осторожность при знакомстве с ними не будет лишней. Например, на сайте www.BlackLightPower.com сообщается о создании нового типа атомарного водорода (hydrino) с энергией, лежащей ниже энергии основного состояния, определяемого законами квантовой механики. А для желающих выйти в параллельные миры с целью передачи сообщений со скоростью, превышающей скорость света, предлагается патент №6025810 (What's New, 17 Mar 00, info.gipn.net). Лев Давидович Ландау (Нобелевская премия по физике 1962 года за работы по сверхтекучести квантовых жидкостей) подобные

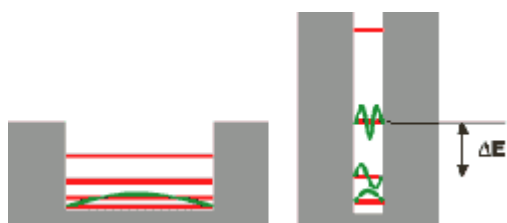
случаи объявлял патологией и далее вопрос не обсуждал. Но вот уже несколько лет в солидном научном журнале «Physical Review» существует раздел, регулярно публикующий работы по проблемам телепортации, издревле считавшейся занятием колдунов и мистиков. Однако в данном случае терминология не должна вводить в заблуждение, квантовая телепортация — это не патология, а часть современной физики, рассматривающая передачу информации на квантовом уровне. Именно в эту область ведет рост рабочей частоты и уменьшение размеров элементарных узлов вычислительных устройств.

Квантовый размер

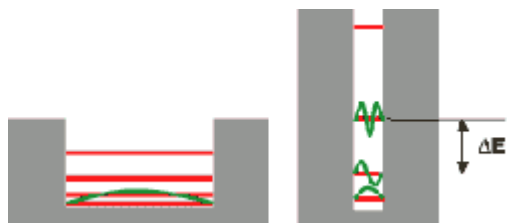
Кучка атомов — кластер или молекула — вот информационная микромашинка недалекого будущего. Это и есть тот уровень миниатюризации, на котором существенны пространственные квантовомеханические эффекты. Квантовый размер малых систем задается длиной волны де Бройля (de Broglie) составляющих системы частиц и расстоянием, на протяжении которого сохраняется когерентность волновой функции. Учтя энергию валентных электронов и зоны проводимости, мы получаем значение длины волны, соответствующей частице, — около нанометра. На подобных расстояниях в квантовом мире становятся заметными явления, невозможные в классической физике, например, прохождение частиц через стенки силовых полей — туннелирование.

Другая важная характеристика волны — длина когерентности. Она характеризует предельное расстояние, на котором волна сохраняет фазу. На меньших расстояниях возможны квантовые эффекты, аналогичные интерференции световых волн. В обычных условиях длина когерентности электрона в твердом теле не превышает 10 нм, поскольку примеси и тепловые колебания атомов сбивают фазу электронной волны. Так что работающие при комнатной температуре суперсовременные 0,13-микронные чипы (130 нм) — это еще не квантовая электроника, но уже где-то рядом. Промышленно развита технология получения квантовых размеров лишь в тонких пленках в направлении, перпендикулярном поверхности (1D-структуры). Сборка более сложных 2D- и 3D-квантовых структур в настоящее время осваивается в лабораториях.

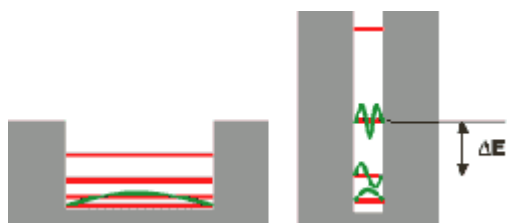
Физические свойства малой частицы вещества — кластера (cluster) — сильно отличаются от свойств больших тел того же химического состава. Например, кластер ртути (которая является металлом), состоящий всего из семидесяти атомов (чуть более 1 нм в поперечнике), по своим свойствам напоминает полупроводник, а состоящий из трех десятков атомов — диэлектрик. Силовое поле, создаваемое атомным или молекулярным кластером, образует потенциальную яму, в которой могут накапливаться другие частицы, например электроны или экситоны. Для создания силовых барьеров в целях удержания квантовых частиц и манипуляции ими можно использовать кластеры металлов, диэлектриков и полупроводников. По установившейся терминологии, квантовой ямой (quantum well) называется любая структура, в которой движение частицы ограничено по одной координате. Если движение ограничено по двум координатам, такая яма называется квантовой нитью, а если по всем трем — квантовой точкой (quantum dot).



Энергия частицы в потенциальной яме квантуется, то есть может принимать только определенный набор значений (рис. 1), причем в широкой яме (рис. 1а) расстояние между энергетическими уровнями меньше, чем в узкой (рис. 1б). Если яма имеет стенки конечной высоты и ширины, частица может покинуть яму, даже не обладая достаточной энергией для преодоления потенциального барьера классическим путем (рис. 2). Это явление называется туннелированием, и оно является чисто квантовым. Однако чем барьер толще и выше, тем меньше вероятность того, что частица покинет ловушку.

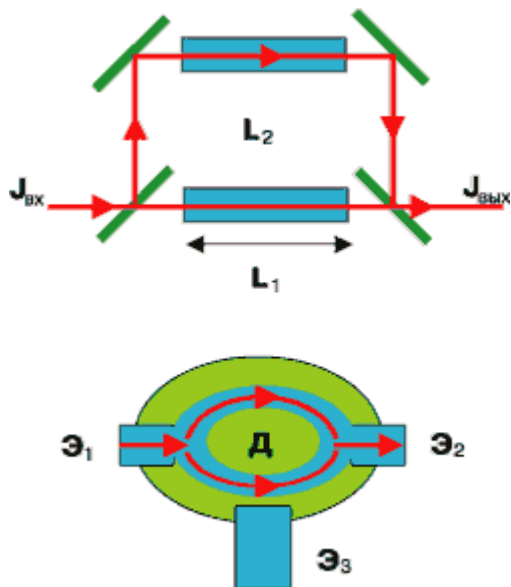


На рис. 3 показано преодоление частицей одиночного потенциального барьера. Амплитуда волны, прошедшей через барьер, меньше, чем до встречи с ним, однако энергия туннелировавшей частицы при этом не изменяется! Такой барьер для частицы может играть роль полупрозрачного зеркала.

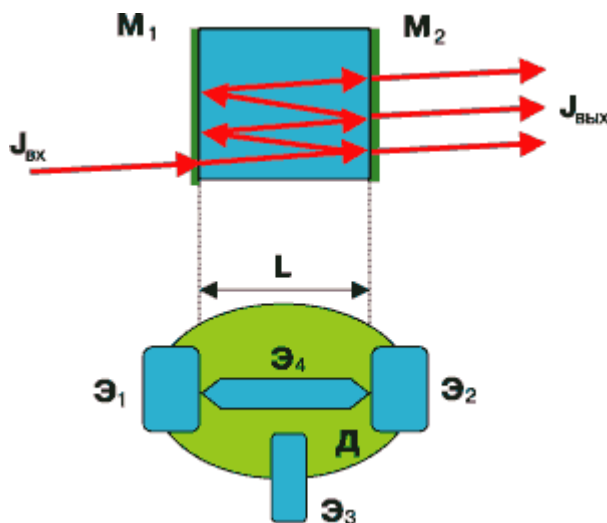


На основе квантовых ям и барьеров можно создавать квантовые транзисторы — устройства переключения сигналов, переносимых квантовыми частицами. С этой целью были разработаны методы формирования квантовых структур различной конфигурации и размера. Так, ширину ямы или барьера можно регулировать, изменяя размер кластера, а высоту или глубину — изменяя его химический состав. Параметрами квантовых ям можно управлять и с помощью приложенного электрического, магнитного или светового поля. Кроме того, можно изготавливать кластеры разной формы, сплющивая или вытягивая их в разных направлениях. Иногда квантовые структуры получают путем создания дефекта в кристаллической решетке, образуя там вакансию или внедряя примесный атом или ион. Сегодня в арсенале физиков имеется богатый набор квантовых систем: ямы, нити, точки, пленки, а также нанотрубы, наносферы, «гигантские атомы», сверхрешетки, фотонные кристаллы и др. Явлениям туннелирования и интерференции мы обязаны рождению таких новинок квантовой электроники, как сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и квантовый транзистор.

Квантовые транзисторы



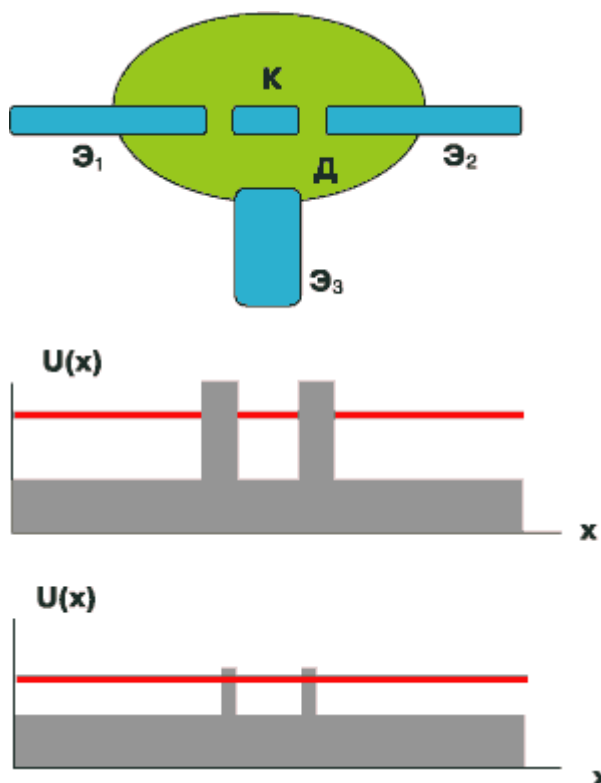
Оптическая аналогия позволяет наглядно представить работу квантового транзистора. На рис. 4 изображен оптический двухлучевой интерферометр, а также схема электронного транзистора с квантовым кольцевым контуром. Пропускание интерферометра (оптического или электронного) определяется простой формулой и однозначно зависит от разности набега фаз по двум путям. Транзисторный эффект достигается за счет изменения фазы волны электрона в одном из плеч интерферометра с помощью затворного напряжения, прикладываемого к электроду $Э_3$.



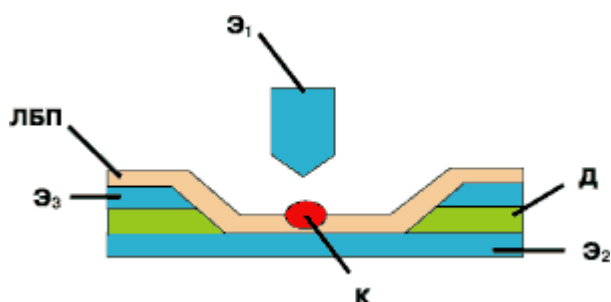
Еще более простая схема квантового транзистора получается, если взять за основу идею интерферометра Фабри-Перо (рис. 5). Здесь оптический резонатор, образованный зеркалами M_1 и M_2 , реализуется в транзисторе с помощью тонкой проводящей нити — квантовой проволоки длиной L , отделенной от электродов $Э_1$ и $Э_2$ полупрозрачными для электронной волны барьерами. Условие максимума пропускания имеет такой же вид, как условие резонанса волны де Бройля в квантовой яме длиной L . Транзисторный эффект достигается путем изменения длины волны электрона с помощью напряжения, приложенного к электроду $Э_3$.

Наряду с интерференционными транзисторами разрабатываются квантовые транзисторы других типов — баллистического, с эффектом Джозефсона, с кулоновской блокадой.

Одноэлектроника



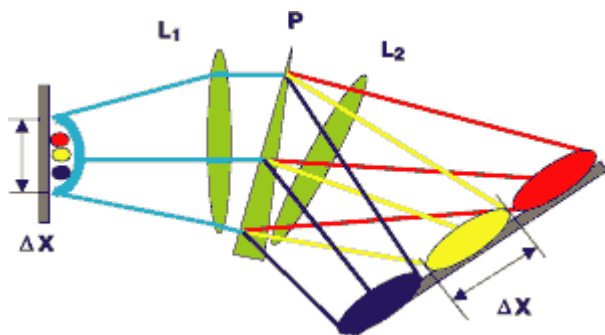
Уменьшая линейные размеры электронных приборов, естественно задаться вопросом: возможна ли обработка информации на основе управления отдельным электроном, атомом или фотоном? Физики давно научились регистрировать отдельные частицы и манипулировать ими в вакууме. Однако твердотельная одноэлектроника (single electronics) — дело новое. В твердом теле электрон может легко потеряться, прилипнуть к какому-нибудь дефекту или рекомбинировать. Кроме того, сигналы, создаваемые одиночными электронами, чрезвычайно малы. Особые неприятности доставляют тепловые колебания атомных частиц. Преодолеть экспериментальные трудности физикам удалось лишь к началу 90-х годов. В результате были созданы так называемые одноэлектронные транзисторы. В основе их работы лежат разные механизмы, в том числе и интерференционные. Интересен механизм, получивший название кулоновской блокады. Дело в том, что энергия заряженного конденсатора быстро растет с уменьшением емкости. Кластер металла или полупроводника имеет емкость, примерно равную его размеру. Если такой конденсатор заряжен одним электроном, то при больших размерах кластера его энергия мала по сравнению с энергией теплового движения и электрон легко отрывается от кластера, участвуя в проводимости среды. Уменьшение емкости до нанометровых размеров позволяет добиться надежной связи электрона с кластером. Так как в основе запирающего электрона в кластере лежит кулоновское взаимодействие, это явление получило название кулоновской блокады. На рис. 6а показано устройство одноэлектронного транзистора, состоящего из электродов Э₁, Э₂ и малого металлического островка (кластера К) с кулоновской блокадой, регулируемой за счет введения дополнительного электрода Э₃. Кластер и электроды разделены диэлектрической средой Д. В закрытом состоянии потенциальный барьер $U(x)$ между кластером и электродами Э₁ и Э₂ препятствует протеканию тока (рис. 6б). Уменьшение потенциальных барьеров с помощью поля, создаваемого управляющим электродом, приводит к появлению проводимости (рис. 6в).



Для получения одноэлектронного режима транзистор с литографическими размерами 20–30 нм необходимо охлаждать до температуры жидкого гелия (4,2 К). Однако если мы хотим работать при комнатной температуре, следует уменьшать размер кластера до 1–2 нм. Современной оптической литографии эта область практически недоступна. В работе [1] для получения столь малых рабочих элементов использовался другой способ — молекулярно-кластерная технология. Схема созданного авторами одноэлектронного транзистора с молекулярным кластером карборана (металлоорганическое вещество с труднопроизносимой химической формулой $1,7-(\text{CH}_3)_2-1,2-\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_9\text{Ti}(\text{OCOCF}_3)_2$) показана на рис. 7.

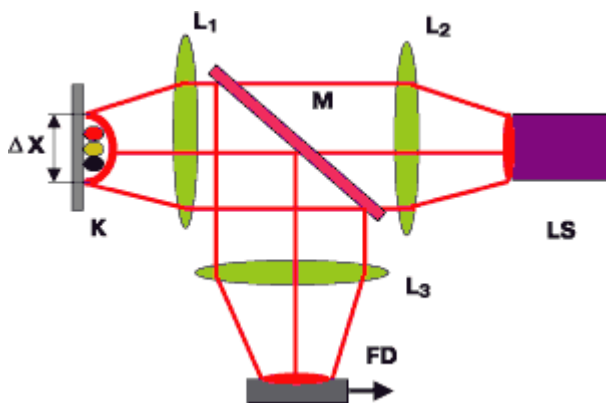
Здесь электрод Э1 — это игла СТМ, который в данной схеме используется также для поиска и точного попадания на карборановый кластер К. Графитовая подложка Э2, кластер К и электрод Э1 образуют квантовую систему с двумя туннельными переходами по схеме рис. 4. Управляющий электрод Э3 изготовлен из золота. Диэлектрик Д — окись алюминия Al_2O_3 . Технологический процесс сборки транзистора осуществлялся с помощью мономолекулярных слоев Ленгмюра-Блоджеттовских (ЛБ) пленок стеариновой кислоты, несущих в себе карборановые кластеры размером 1–2 нм. Путем испарения раствора, содержащего кластеры и стеариновую кислоту, создавались пленки ЛБ со средним расстоянием между кластерами порядка 20 нм. Это дает плотность упаковки, равную 2500 рабочим элементам на квадрате со стороной 1 мкм! Замечательно, что цикл подобных работ выполнен российскими исследователями в рамках программ и при поддержке (финансировании) отечественных фондов. Что касается квантовых транзисторов большого размера, работающих при температуре жидкого гелия, то их фотографии можно найти на сайте Sandia National Labs (www.sandia.gov/media/quantran).

Нанооптика

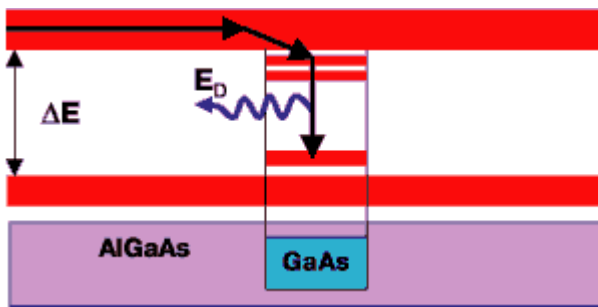


Оптика отдельного атома или молекулы, как и оптика отдельного фотона, уже давно является предметом серьезных научных изысканий. Она имеет большое прикладное значение, в том числе в информационных технологиях. Например, известно, что разрешающая способность классического оптического прибора с передачей изображения ограничена длиной волны света. Именно для увеличения разрешения создавались микроскопы нового типа — электронно-лучевой, сканирующий туннельный, атомно-

силовой, оптический сканирующий и др. Это обстоятельство порой приводит к заблуждению, будто предельная плотность упаковки рабочих элементов с оптическим доступом к информации ограничена дифракционным пределом, то есть длиной волны света. Однако это не так: длина волны света не ограничивает миниатюризацию источников излучения. А ведь таким источником может быть, например, отдельный атом, размеры которого порядка 0,1 нм, что во много раз меньше длины волны света. Если заставить излучать отдельный атом и наблюдать за ним в микроскоп, то отчетливо видно небольшое пятнышко. Но даже с использованием самой лучшей оптики размер пятна не может быть меньше длины волны света. Тем не менее, способы повышения плотности записи оптической информации существуют. Один из них показан на рис. 8. Здесь три кластера, излучающие на разных длинах волн, находятся друг от друга на расстоянии, меньшем размера дифракционного пятна ΔX , однако оптическая система, состоящая из линз L_1 , L_2 и призмы P , разводит изображения кластеров на расстояние, превышающее дифракционный предел.



Главное условие — излучающие объекты, находящиеся в пределах одного дифракционного пятна, должны отличаться по какому-либо другому физическому параметру — длине волны, поляризации или фазе излучения. Тогда плотность упаковки информации с оптическим доступом будет определяться лишь размером атома, кластера или молекулы. С использованием лазера, перестраиваемого по частоте, принципиальная схема устройства оптической памяти типа ROM (read-only memory) получается более компактной (рис. 9). Здесь излучение от лазера LS падает на подложку, несущую селективно возбуждаемые кластеры K . Сигнал флуоресценции кластера данного типа, отражаясь от зеркала M , попадает на фотоприемник FD . Количество информации, которое можно записать в пределах одного дифракционного пятна, равно отношению ширины диапазона перестройки лазера по частоте Dl к суммарной ширине линии лазерного излучения и линии флуоресценции dl . Именно по этому пути идет компания Constellation 3D (www.c-3d.net), разрабатывающая многослойные флуоресцирующие диски и карточки («КТ» #339). Для $Dl=100$ нм и $dl=0,01$ нм получаем 104-кратное повышение плотности записи информации по сравнению с обычным CD. Если в этой же схеме вместо линзовой системы использовать волоконный осветитель с туннельным эффектом для фотонов, плотность упаковки информации можно повысить еще в сто раз!



Большие перспективы открываются при объединении фотоники с нанoeлектроникой. С уменьшением длины волны фотонов растет их энергия. Когда длина волны становится равной длине волны де Бройля валентных электронов, энергия оптического кванта составляет уже сотни электрон-вольт. Это очень большая энергия. Она лежит в рентгеновской области, где твердые тела практически прозрачны. Рентгеновская оптика — еще одна отрасль квантовой физики, способная оказать большое влияние на развитие элементной базы вычислительных машин, однако в компьютерах ближайшего будущего длина волны света скорее всего будет ограничена снизу областью 200 нм. Возникает интересная аналогия. При тактовой частоте 1 ГГц обычного современного компьютера длина электромагнитной волны равна 30 см, что много больше характерного размера транзистора, но сопоставимо с размерами системной платы. С другой стороны, свет, длина волны которого в видимой области во много раз больше элементов нанoeлектроники, можно использовать для синхронизации работы сверхминиатюрных квантовых структур, например квантовых ям и точек. На рис. 10 показана схема энергетических уровней квантовой точки, сформированной на основе гетероатомного кластера GaAs в среде AlGaAs.

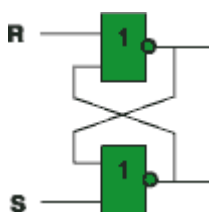


Квантовая точка — это как бы большой искусственный атом, в котором, изменяя размер потенциальной ямы и состав примесей, можно управлять положением энергетических уровней и, соответственно, длиной волны излучения. Электрон, попадающий из зоны проводимости на возбужденные уровни квантовой точки, испускает фотон и переходит на уровни, примыкающие к валентной зоне. Заселяя с помощью квантового транзистора верхние уровни квантовой точки, можно получить регулярный поток однофотонных импульсов. Такие оптические сигналы имеют непуассоновскую статистику и представляют большой интерес для разрабатываемых в настоящее время принципов квантовой передачи и обработки информации. Можно также синхронизовать излучение различных квантовых точек друг с другом, создать среду с оптическим усилением, лазерным эффектом. Квантовые точки могут иметь очень малые размеры по сравнению с длиной волны видимого света — всего несколько атомных диаметров, что дает потенциально высокую плотность их упаковки (до 10^8 – 10^9 на кубический микрон!). Современные методы изготовления квантовых точек — в основном литографические, и поэтому по двум координатам они получаются довольно крупные — порядка 100–300 нм.

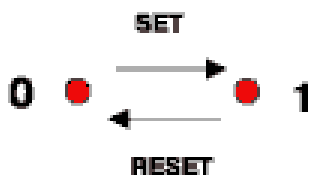
Зато по третьей координате путем напыления создают покрытия любой толщины, вплоть до одноатомных слоев, то есть порядка 0,2–0,5 нм. Уже сегодня это дает плотность упаковки порядка 10⁵ точек на кубический микрон. Разрабатываются и другие способы выращивания квантовых точек. Они базируются в основном на молекулярно-кластерных технологиях, в том числе с использованием молекулярных пучков.

Многообещающей является реализация идей физики многофотонных процессов. В частности, двухфотонное поглощение, основанное на взаимодействии квантовой структуры с двумя световыми волнами одновременно, может быть использовано для построения оптической трехмерной памяти. Такие работы ведутся в ряде исследовательских центров, например в Университете Аризоны (Tucson) или в Госуниверситете Нью-Йорка (Buffalo).

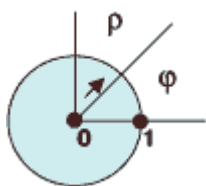
Квантовые биты



Вычислительная машина, собранная из квантовых транзисторов, — это, вообще говоря, еще не квантовый компьютер. Остается открытым вопрос о способе системной интеграции новых ключевых элементов в пространстве и времени с целью реализации вычислительного процесса. Но в первую очередь надо разобраться в главном: можно ли вообще вести речь об информации и алгоритмах, если мы уже стоим одной ногой на поле квантовой механики? То смятение, которое испытали философы начала XX века, переваривая идеи квантовой механики и теории относительности («атом дематериализуется, материя исчезает» и т. п.), вполне понятно: новая физика бросала дерзкий вызов здравому смыслу, основанному на предшествующем опыте человечества. Нечто подобное следует ожидать в начале XXI века в области компьютерных и информационных технологий. Дело в том, что обычный массовый компьютер с точки зрения кибернетики — это конечный, дискретный и детерминированный автомат. Конечный — это значит, что множество его состояний и входов конечно. Дискретный — что он работает в дискретном времени с шагом, определяемым частотой тактового генератора. Детерминированный — что, будучи приведенным в данный момент времени в заданное начальное состояние с заданным входом, он на следующем шаге своего функционирования всегда перейдет во вполне определенное состояние, однозначно задаваемое его определяющей логической функцией. Разрабатываемые в настоящее время квантовые транзисторы позволяют строить привычные логические элементы AND, OR или NOT, работающие в режиме макроскопической детерминированности. То есть как будто нам удалось уменьшить ширину литографской линии в обычном чипе до размеров атома. Это направление развития вычислительной техники не требует кардинального пересмотра идеологии вычислительного процесса как такового, поскольку лишь заново реализует формальную булевскую логику.

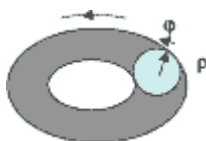


Однако существует и другая возможность, основанная на новом, квантовомеханическом понимании информации. В науке, надо отметить, постепенно вызревает точка зрения, что информация составляет такую же фундаментальную категорию, как материя и энергия. Современная физика уже занялась изучением общих законов движения информации в виде перехода ее из одной формы представления в другую. Действительно, виртуальность компьютерного мира, о которой слышишь буквально на каждом углу, на самом деле иллюзорна. Информация всегда существует в каком-либо физическом представлении: на бумаге, на дискете, в виде радиоволн, зарядов, намагниченности среды, звука, биологических структур и пр. Любая виртуальность реальна: игры, прослушивание новостей, чтение, просмотр видео, прогулка, даже фантазирование и сочинение сказок основаны на реальных физических процессах и связаны с изменением состояния конкретных физических объектов. Квантовый компьютер начинается с нового, квантовомеханического представления о состоянии физического объекта. Примером такого представления является волновая функция, а волны, как известно, могут накладываться друг на друга, образуя сложные волновые структуры. Квантовые состояния, обладающие свойством суперпозиции, можно линейно складывать, получая при этом новые состояния. Для сравнения возьмем простейший классический автомат, например RS-триггер. Он может находиться лишь в двух состояниях, условно обозначаемых «0» и «1», и соответствующих логическому нулю и логической единице (рис. 11а). Количество информации, необходимое для задания состояния такого автомата, принимается за единицу измерения классической информации и называется битом.



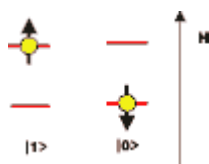
Квантовым аналогом простейшей классической системы является квантовомеханическая система с двумя базисными состояниями, которые мы назовем «0» и «1». Пример — взаимодействие спинового магнитного момента электрона с внешним магнитным полем (рис. 11б). Кроме двух базисных, такая квантовая система может находиться в любом из состояний, задаваемом их линейной комбинацией: $y = a|0\rangle + b|1\rangle$, где a и b — любые комплексные числа, удовлетворяющие условию $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Количество информации, необходимое для задания состояния двухуровневой квантовой системы (квантового триггера), принимается за единицу измерения квантовой информации и называется кубитом (quantum bit, или qubit). Кубитом принято также называть саму двухуровневую квантовую систему.

Наглядно представить себе, как соотносятся бит с кубитом, можно, подходящим образом выбрав параметризацию комплексных чисел a и b . В то время как множество состояний его классического собрата изображается всего лишь двумя точками (рис. 11в), множество состояний квантового триггера (кубита) являет собой трехмерное тело — тор — и зависит от трех координат (рис. 11г).



Если в первом случае возможны лишь прыжки из состояния «0» в состояние «1» и обратно, то для кубита возможны любые движения внутри тора. Если ограничиться лишь внутренними состояниями квантового триггера, то множество состояний кубита можно

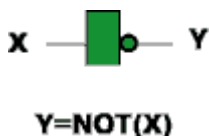
изобразить в виде единичного круга, на который можно спроектировать множество состояний обычного триггера (рис. 12д).



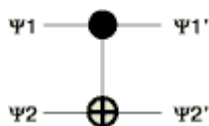
Видно, что сложность кубита континуальна; она несоизмеримо выше сложности бита. Такой результат вдохновляет. Он на много порядков повышает оцениваемую до настоящего времени меру сложности человеческого разума. Действительно, на самом деле человек является субъектом квантового, а не формально-логического мира.



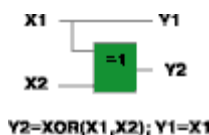
Таким образом, формальные переменные в квантовой информатике принимают значения, измеряемые кубитами. Их принято обозначать так же, как и квантовые состояния, — греческой буквой ψ . Над кубитами определяются функции, значения которых — кубиты.



В квантовой логике, как и в классической, существуют базисные функции, из которых можно построить любые другие функции. Примером квантовых функций, образующих базисный набор, являются однокубитовый элемент Q и двухкубитовый элемент «управляемое НЕ», CNOT (controlled NOT).



Элемент Q имеет один вход и один выход (рис. 12а). Он трансформирует переменную-кубит в пределах круга, задаваемого параметрами (r, j) (рис. 12д). При проекции в область классической логики квантовый элемент Q может дать, например, обычное отрицание — булевское NOT (рис. 12в).



Квантовый элемент CNOT имеет два входа и два выхода (рис. 12б). На описывающем его графе темная вершина ставится на ребро переменной, которая не изменяется, но влияет на значение второй переменной. На ребро второй переменной ставится знак, аналогичный знаку функции «исключающее ИЛИ» (XOR), в которую квантовый элемент CNOT превращается при проекции в обычную логику. Следует обратить внимание на то что, функция NOT в паре с XOR в классической логике не является базисной. Из этой пары невозможно построить компьютер. Необходимым свойством NOT обладает лишь в паре с AND или OR. В квантовом случае, как видим, все не так! Оказывается, можно извлечь корень квадратный из квантового бита, и это даст новое значение. Вообще, с кубитами можно делать то, что у любителя железной логики может вызвать легкую панику:

X: = SQRT("FALSE"); "ПРАВДА":= ("ИСТИНА")²/3;

Телепортация и все такое



Первые идеи квантовой информатики зародились сразу же после пионерских работ Планка, Эйнштейна, де Бройля, Бора и других отцов-основателей квантовой физики. Существенное развитие они получили с созданием квантовой механики в представлениях Шредингера и Гейзенберга. Всевозможные мысленные эксперименты, проводимые с квантовыми объектами, зачастую вели к явным парадоксам. Таков парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена (1935 год) о корреляции между двумя измерениями, проводимыми в разных точках пространства, опираясь на который, Дж. Белл (J. Bell) в 1964 году математически точно описал принципиальную разницу в получении информации о системе в квантовом и классическом случаях. Осуществленное впоследствии экспериментальное подтверждение выведенных Беллом неравенств свидетельствовало в пользу вероятностной трактовки квантовой механики. Это опровергло тезис Альберта Эйнштейна о том, что Господь Бог не играет в кости. А Нобелевский лауреат в области физики Ричард Фейнман считал, что сложность решения квантовых задач слишком высока для классических компьютеров и что для этой цели было бы естественно использовать квантовые компьютеры. Фейнман имел в виду не квантовые вычисления общего вида, а лишь моделирование одних квантовых систем с помощью других, более удобных в обращении. Поток публикаций по квантовым компьютерам и квантовой информатике резко возрос во второй половине 90-х годов. Сегодня практически все ключевые фигуры в этой области — физики-теоретики. Однако реализуются идеи квантовой информатики талантом и умением экспериментаторов. Наряду с квантовыми транзисторами с переносом электронов и оптическими транзисторами с переносом фотонов прорабатываются различные схемы, использующие переключение состояния магнитного момента электрона и атомного ядра, квантование магнитного потока, переходы между энергетическими уровнями отдельных атомов и ионов и многое другое. Недавно был разработан новый материал для квантовых структур с пониженной размерностью, в которых возникают волны зарядовой плотности, так называемая голубая бронза — вещество с химической формулой $X_{0,3}MoO_3$, где $X = K, Rb, Cs$. Среди других интересных новшеств отметим разработки регистров для хранения кубитов и выполнения операций с ними. В одном случае это ионы, помещенные в условиях глубокого вакуума в квадрупольную ловушку и образующие одномерную структуру, состояниями которой можно управлять с помощью перестраиваемых лазеров. В другом — это ионы редкоземельных элементов, например прометия Pr^{3+} , помещенные в монокристалл LaF_3 , ими также управляют с помощью лазерных пучков (Казанский физико-технический институт). Рассматриваются способы переноса, хранения и обработки информации с помощью псевдочастиц: дырок, магнонов, баблонов, экситонов, солитонов и др. И несмотря на то, что многие из перечисленных персонажей по сей день являются

объектами фундаментальных исследований, технологи информационного машиностроения уже нашли им практическое применение.



Первые электронные компьютеры потребляли десятки киловатт энергии. Сегодня исследуется возможность создания квантовых компьютеров, реализующих холодные вычисления, то есть практически без затрат энергии. Ведь трение, ведущее к бесполезному расходованию энергии, — понятие макроскопическое. В квантовом мире главный вредитель — шум, исходящий из некоррелированного взаимодействия объектов друг с другом. Известны разные способы борьбы с квантовыми шумами. Можно использовать алгоритмы восстановления квантовых состояний, вызванных шумами, а можно создавать условия, когда вредные процессы запрещены правилами отбора, выражающими фундаментальные законы природы. Один из примеров — правила, запрещающие излучение метастабильно возбужденного атома гелия. Именно благодаря существованию таких атомов и был создан первый газовый лазер на смеси гелия с неоном (А. Джаван, 1960). Впечатляющий пример холодных вычислений дает оптический когерентный процессор. Здесь энергия затрачивается только на ввод данных и на считывание результатов вычислений.

Сегодня уже прорабатываются идеи создания квантовых суперкомпьютеров с геометрическими размерами порядка 10–20 мкм! Где же предел плотности упаковки вычислительных элементов? Интересный результат был получен в 1962 году Бремерманном (Н. Bremermann). Опираясь на принцип неопределенности Гейзенберга для энергии и времени $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$, где ΔE — точность определения энергии, а Δt — длительность времени измерения, и используя релятивистское соотношение Эйнштейна между массой и энергией $E = Mc^2$, можно оценить верхнюю границу скорости обработки информации в расчете на один грамм массы компьютера. Находим предельную производительность квантового компьютера на грамм массы: $P/M = 1,36 \times 10^{47}$ бит/с. С подробностями можно ознакомиться в [2]. Разумеется, этот результат устанавливает лишь предельную скорость обработки информации. Она реализуется в фантастических условиях, когда наступает полная эквивалентность энергии, массы и информации.

Квантовая телепортация, то есть передача квантовой информации на расстояние, — гораздо более глубокий механизм, чем просто передача точек и тире по проводам или отправка апельсинов бочками. При квантовой телепортации информация о состоянии объекта передается от источника приемнику без производства измерения состояния источника в классическом понимании.

Например, для того, чтобы Алиса могла послать яблоко Борису (рис. 13), они оба должны хранить, каждый у себя, пару квантовых частиц — кубитов PSI, которые когда-либо взаимодействовали друг с другом и, следовательно, состояния которых перемешались. Телепортацию можно рассматривать как процесс функционирования квантового компьютера. В этом процессе состояние яблока, а следовательно, и само яблоко, можно передать от Алисы к Борису не путем физического перемещения исходного объекта, а путем физического перемещения квантовой информации о нем. В нашей истории Алиса не забывает клонировать парочку фруктов и для себя. В свете того, что биологическое клонирование уже освоено современной наукой, квантовая телепортация не кажется слишком невероятной. Тем не менее, физическая телепортация дает принципиально новое качество, состоящее в том, что при биологическом клонировании копирование исходника происходит только на генетическом уровне. Все знания, особенности роста, кормления, воспитания исходника биологическому клону не передаются. Вы получаете идеального биологического близнеца — и не более того. Другое дело — клонирование при квантовой телепортации. Здесь информация об исходнике копируется на момент текущего состояния физического объекта вместе со всеми его знаниями, воспоминаниями, привычками и т. д. Сдвиг клона в пространстве помогает избежать множества парадоксов. Если клоны — люди, то самое лучшее — послать их на все четыре стороны, обеспечив им с момента телепортации разную историю. В будущем сети квантовой телепортации получат такое же распространение, как современные телекоммуникационные сети. Кстати, квантовые вирусы будут гораздо опаснее нынешних сетевых, так как после своей телепортации они смогут существовать вне компьютера. Квантовая телепортация может осуществляться со скоростью света, при этом кубиты информации можно переносить фотонами. Экспериментально идеи телепортации проверены пока лишь на простейших квантовых частицах («КТ» #346).



К настоящему времени квантовая информатика обрела все признаки точной науки, включая систему определений, постулатов и строгих теорем. К числу последних относится, в частности, теорема о невозможности клонирования кубита (No cloning theorem), строго доказанная с применением теории унитарного оператора квантовой эволюции. Дело в том, что создание двух кубитов — абсолютных копий друг друга — приводит к противоречию, которое можно было бы назвать парадоксом квантовых близнецов. Однако не следует переоценивать значение этой теоремы, полезность ее весьма абстрактна. Например, и без того ясно, что создание двух электронов в одном и том же квантовом состоянии невозможно в силу ограничения, накладываемого принципом Паули. Парадокс близнецов не возникает, если при клонировании снабжать копии отличительными признаками: пространственно-временными, фазовыми и др. Тогда генерацию лазерного излучения можно понимать как процесс клонирования фотона-

затравки, попавшего в среду с оптическим усилением. Если же к квантовому копированию подходить строго, то рождение клона должно сопровождаться уничтожением исходника. А это и есть телепортация.

Итак, квантовые переменные и функции определены, а устройства, их реализующие, разрабатываются и тестируются. И даже если квантовый компьютер существует сегодня главным образом в нашем воображении и формулах ученых, то и воображение, и формулы — самая настоящая квантовая реальность!

Источник: <http://offline.computerra.ru/print/offline/2000/364/4894/>

Георгий Жувикин

George.Zhuvikin@pobox.spbu.ru

Получено

с

http://wiki.miem.edu.ru/index.php/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B%2C_%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_...

Категории: [Схемотехника](#) | [Банк знаний](#)