

УДК 621.385.6

В. Ф. ОЛЕЙНИК, д-р техн. наук, В. П. ПАВЛОВ, П. П. ПАВЛОВ,  
В. В. ПОПОВСКИЙ, д-р техн. наук

### НА ПУТИ К КВАНТОВОМУ МИРУ

#### Введение в истоки квантовой механики

Германский физик Макс Планк в 1900 г., разрешая противоречие классической физики в модели для излучения абсолютно черного тела, названного «ультрафиолетовой катастрофой», предположил, что обмен энергией между атомными осцилляторами и излучение ими электромагнитных полей происходит квантами [1].

Макс Планк открыл некую константу, связывающую энергию фотона с его частотой:

$$E = h\nu, \quad (1)$$

где  $E$  – энергия кванта,  $h$  – постоянная Планка (здесь и везде),  $\nu$  – частота излучения (здесь и везде).

В честь первооткрывателя эту константу назвали постоянной Планка:

$$h = (6.62618 \pm 0.0004) \times 10^{-34} \text{ Дж} \times \text{с}.$$

В 1905 году Альберт Эйнштейн, развивая квантовые представления, объяснил законы фотоэффекта [1]. Он исходил из того, что монохромный свет имеет дискретную структуру, а излучение состоит из совокупности квантов. Каждый квант несет энергию, которая пропорциональна его частоте, а коэффициент пропорциональности равен постоянной Планка. При этом электрон, находящийся внутри вещества, поглощая квант света, либо покинет вещество, либо останется внутри:

$$E_{эл.} = h\nu - E_{вых}, \quad (2)$$

где  $E_{эл.}$  – кинетическая энергии электрона,  $E_{вых}$  – работа выхода электрона,  $h\nu$  – энергия кванта падающего излучения.

Самым заметным вкладом в начальное зарождение квантовой механики можно считать разработку датчанином Нильсом Бором в 1913 г. теории, объяснившей планетарную модель строения атома – ранее созданную Эрнстом Резерфордом. Бор предположил, что электроны могут находиться только на определенных дискретных орбитах, соответствующих различным энергетическим уровням, и что "перескок" электрона с одной орбиты на другую с меньшей энергией сопровождается излучением фотона, энергия которого равна разности энергий двух орбит [2, 3].

Новая существенная особенность квантовой теории проявилась в 1924 г., когда Луи де Бройль выдвинул радикальную гипотезу о волновом характере материи: если электромагнитные волны, например свет, иногда ведут себя как частицы (что показал Эйнштейн), то частицы, например электрон при определенных обстоятельствах, могут вести себя как волны. Де Бройль предположил, что между корпускулярными и волновыми свойствами электрона существует такая же связь, как и между соответствующими характеристиками фотонов [2, 3]. Де Бройль предположил, что для электрона, как и для фотона справедливо выражение

$$p = m \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{v} = \frac{h \cdot \nu}{v} = \frac{h}{\lambda}, \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (4)$$

где  $p$  – импульс частицы,  $m$  – релятивистская масса частицы,  $v$  – скорость частицы,  $\lambda$  – деброевская длина волны.

Впоследствии оказалось, что формулы (3) и (4) справедливы для любых микрочастиц и систем, состоящих из них. Формула де Бройля применима к любым частицам, простым

и сложным. Однако дифракционные явления (волновые свойства частиц) можно наблюдать далеко не всегда. Это происходит в силу того, что длина волны де Бройля обратно пропорциональна массе частиц. Так, если для электрона с энергией в 1 эВ получается сравнительно очень большая величина длины волны  $\lambda = 12,3 \text{ \AA}$ , то для протона той же энергии она составляет уже  $\lambda = 0,28 \text{ \AA}$ , а для молекулы кислорода при комнатной температуре  $\lambda = 0,14 \text{ \AA}$ .

Что касается макроскопических частиц материи, то их дифракцию наблюдать невозможно. Например, для пылинки массой  $10^{-12} \text{ г}$  волна де Бройля имеет величину порядка  $10^{-17} \text{ м}$ .

Обнаружение волновых свойств микрочастиц было тем рубежом, который показал, что классическая механика не может дать правильного описания поведения подобных частиц. Возникла необходимость создать механику микрочастиц, которая учитывала бы также и их волновые свойства.

Вернер Гейзенберг, Макс Борн и Паскуаль Йордан в 1925 г. опубликовали вариант квантовой теории, получившей название матричной механики, которая описывала квантовые явления с помощью таблиц наблюдаемых величин. Корпускулярно-волновой дуализм, а также опыты по дифракции электронов и протонов показали, что микрочастицы имеют волновые свойства и не являются материальными частицами в классическом понятии этого слова. Это привело к дальнейшему развитию квантовой механики. Для микрочастиц были введены понятия делокализации и волновой функции. Принцип неопределенности Гейзенберга [2, 3] показал невозможность одновременного нахождения двух параметров для микрочастиц. Электрон, как и фотон, не может иметь одновременно определенную координату и импульс:

$$\begin{aligned} \Delta x \cdot \Delta p_x &\geq h, \\ \Delta y \cdot \Delta p_y &\geq h, \\ \Delta z \cdot \Delta p_z &\geq h, \\ \Delta E \cdot t &\geq h, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – среднеквадратическое отклонение по координатам.  $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$  – среднеквадратическое отклонение по импульсам.  $\Delta E$  – среднеквадратическое отклонение по энергии.  $t$  – время.

В 1926 г. Шрёдингер применил к построению квантовой теории волновое описание движения электрона во внешнем поле, он намеревался сблизить квантовую теорию с классической физикой, которая накопила немало примеров математического описания волн. Шрёдингер назвал свою теорию волновой механикой. Решения волнового уравнения находились в согласии с экспериментальными наблюдениями и оказали глубокое влияние на последующее развитие квантовой теории [1 – 3].

Шрёдингер показал, что волновая механика и матричная механика математически эквивалентны. Известные ныне под общим названием квантовой механики, эти две теории дали долгожданную общую основу описания квантовых явлений.

Отказавшись от описания движения частицы с помощью траекторий, получаемых из законов Ньютона, Шрёдингер определил вместо этого волновую функцию  $\Psi$ , ввел в рассмотрение уравнение, эквивалентное законам Ньютона и дающее рецепт для нахождения  $\Psi$  в частных физических задачах. Пусть волновая функция задана в  $N$ -мерном пространстве.

тогда в каждой точке с координатами  $\vec{r}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , в определенный момент  $t$  она будет иметь вид  $\Psi(\vec{r}, t)$ . В таком случае уравнение Шрёдингера запишется в виде

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\vec{r}, t) + E_p(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, t) = -\hbar i \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t), \quad (6)$$

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ,  $h$  – постоянная Планка;  $m$  – масса частицы;  $E_p(\vec{r})$  – внешняя по отношению к частице потенциальная энергия в точке  $\vec{r}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Квантовая механика оперирует только с вероятностями. Пусть  $P(x, y, z, t)$  – пространственное распределение вероятностей, определенное таким образом, что интеграл от  $P$  по конечному объему пространства дает вероятность обнаружить частицу в этом объеме. Следуя Макс Бурну, придем к гипотезе, что если система находится в состоянии  $\Psi$ , плотность вероятности

$$P(x, y, z, t) = \Psi \cdot \Psi^* \quad (7)$$

Она зависит не только от координат пространства, но и от момента времени, поскольку от них зависит  $\Psi$ .

Для волновых функций справедлив принцип суперпозиции, заключающийся в том, что если система может пребывать в состояниях, описываемых волновыми функциями  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ , то она может пребывать и в состоянии, описываемом волновой функцией  $\Psi_\Sigma = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$  при любых комплексных  $c_1$  и  $c_2$ . Очевидно, что можно говорить и о суперпозиции (сложении) любого числа квантовых состояний, т. е. о существовании квантового состояния системы, которое описывается волновой функцией

$$\Psi_\Sigma = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2 + \dots + c_n\Psi_n = \sum_{n=1}^N c_n\Psi_n \quad (8)$$

В таком состоянии квадрат модуля коэффициента  $c_n$  определяет вероятность того, что при измерении система будет обнаружена в состоянии, описываемом волновой функцией  $\Psi_n$ .

Поэтому для нормированных волновых функций  $\sum_{n=1}^N |c_n|^2 = 1$ .

Таким образом, к началу 1927 г. Шрёдингером, Гейзенбергом, Дираком и другими была создана новая механика, получившая название волновой или квантовой механики.

Квантовая механика Шредингера была нерелятивистской ситуацией, т. е. соответствовала ситуации, когда скорости частиц малы по сравнению со скоростью света.

В 1928 г. Дирак получил релятивистское волновое уравнение для электрона и этим создание основ квантовой теории в основном завершилось.

В это же время Э. Ферми и П. Дирак получили квантово-статистическое распределение для электронного газа, учитывающее при заполнении отдельных квантовых состояний квантовый принцип, сформулированный тогда же В. Паули [3].

Анализ квантовомеханической задачи о движении электрона во внешнем периодическом поле, создаваемом атомными остатками в кристаллической решетке, выполненный Ф. Блохом в 1928 году, показал, что электронный энергетический спектр в кристаллическом твердом теле имеет зонную структуру [2]. Это привело к существенным изменениям наших представлений о Природе вообще и о твердом теле в частности.

К 1930 г. было установлено, что в отличие от металлов, для полупроводников, как и для диэлектриков, характерно наличие в зонном энергетическом спектре запрещенной зоны между потолком наиболее высоко лежащей заполненной зоны и дном самой нижней пустой зоны. Однако у полупроводников ширина запрещенной зоны достаточно мала и через нее за счет теплового возбуждения с заметной вероятностью могут перебрасываться электроны. В 1931 году А. Вильсоном было показано, что проводимость полупроводников имеет место лишь при наличии незаполненных зон [4]. Ток, создаваемый электронами неполностью заполненных зон, оказывается эквивалентным току, создаваемому некоторыми квазичастицами с положительным зарядом – дырками, заполняющими уровни, незанятые электронами. При этом длина свободного пробега электронов и дырок в кристалле определяется рассеянием их на искажениях идеального периодического потенциала примесями, дефектами и колебаниями кристаллической решетки. Полупроводники, в зависимости от преобладания числа электронов или дырок, стали относить к электронному  $n$  или дырочному  $p$  типам проводимости.

Таким образом, выяснилось, что характерные для полупроводников свойства обусловлены зонным характером электронного энергетического спектра, то есть являются проявлением квантовых свойств твердого тела.

В результате, уже в начале 30-х годов были заложены надежные теоретические основы для дальнейшего развития физики полупроводников и, в частности, контактных явлений в *p-n*-переходах. Интерес к этим переходам стал возрастать с тех пор, как Б. И. Давыдов [4] в 1938 г. опубликовал первую теорию явлений выпрямления и возникновения фотоэДС в таких переходах.

### От транзистора к нанокomпьютеру

Ряд крупнейших технических достижений XX века основан на специфических законах квантовой механики. Так, квантовомеханические законы лежат в основе работы большинства электронных приборов, проявляются в ряде явлений в металлах и полупроводниках, используемых в новейшей технике.

В 1946 г. при лаборатории "Белл Телефон" была создана группа во главе с Уильямом Шокли, проводившая исследования свойств полупроводников на кремнии (Si) и германии (Ge). В результате многочисленных экспериментов 23 декабря 1947 г. с помощью сотрудников лаборатории "Белл Телефон" – Бардина и Браттейна, под руководством Шокли на свет появился точечный транзистор [5, 6], обеспечивающий усиление сигнала. Изобретение транзисторов явилось знаменательной вехой в истории развития электроники и поэтому его авторы Джон Бардин, Уолтер Браттейн и Уильям Шокли были удостоены нобелевской премии по физике за 1956 г.

Мир шагнул в эру цифровых технологий. Их открытие стало началом полупроводниковой эры, родившей огромное количество типов диодов и транзисторов, а позднее – интегральных микросхем. С появлением в 70-е годы биполярных полевых транзисторов начали воплощаться идеи разработки малогабаритных ЭВМ.

Современный этап развития техники характеризуется всевозрастающим проникновением электроники во все сферы жизни и деятельности людей. По данным американской статистики до 80% от объема всей промышленности занимает электроника.

В 1997 г. компания Intel, одна из ведущих в сплитчоновой долине в Калифорнии, производила микропроцессоры для 90% всех персональных компьютеров планеты. В 1999 г. ежемесячно фирма производила – 4 квадриллиона транзисторов, т.е. более полумиллиона на каждого жителя планеты.

Развитие телекоммуникационных и информационных технологий и средств было особенно стремительным, после того как изобретение компьютеров позволило производить сложные информационные вычисления вне человеческих умов. История компьютерных технологий включает в себя последовательность переходов от одного физического исполнения к другому: от шестеренок к реле, от реле к клапанам, от клапанов к транзисторам, от транзисторов к интегральным цепочкам, микросхемам и микропроцессорам и так далее.

Основными показателями этого развития являются скорости передачи и обработки информации, а также конструктивные размеры и энергопотребление.

Символично, что в 2000 г. "за основополагающие работы в области информационных и коммуникационных технологий" российский ученый академик Ж. И. Алферов и американский физик Г. Кремер были удостоены Нобелевской премии.

Именно в этой области человеческой деятельности в последние десятилетия происходят революционные изменения. Главные же открытия, сделанные Алфёровым, связаны с физическими исследованиями гетеропереходов в полупроводниках [7 – 11]. Важным для развития гетероструктур стала возможность использования квантово-размерных явлений для управления спектром электронов в кристаллах. Это позволило создать сверхбыстрые биполярные гетеротранзисторы и так называемые транзисторы на высокой электронной подвижности, что повысило быстродействие электронных компонент на их основе, а в области оптической электроники были созданы принципиально новые типы полупроводниковых лазеров [12, 13]. Сейчас лазеры на гетероструктурах используются для закачки информации в межконтинентальные оптоволоконные кабели. Лазер с двойной гетероструктурой используется теперь в каждом доме для проигрывания и записи компакт-дисков.

В течение нескольких последних десятилетий возможности компьютеров возрастали с невероятной скоростью, удваиваясь в течение нескольких лет. Это увеличение является следствием продолжающейся миниатюризации основного базового элемента компьютера – транзистора. Чем меньше транзистор – тем большее их число можно интегрировать в один микрочип, тем самым, увеличивая вычислительную способность. Однако процесс миниатюризации достигает сейчас своего предела, квантового порога, ниже которого транзисторы перестанут работать. В настоящее время существуют компоненты с характеристиками в несколько сотен нанометров (нанометр – тысячная микрона, миллиардная метра). Если эти чипы уменьшать далее, к размерам всего в десятки нанометров, тогда их работа будет нарушена появлением квантовых феноменов, вроде электронного туннелирования через препятствия между каналами. Для того чтобы вычислительная наука могла совершенствоваться далее, необходимо найти альтернативу транзисторной технологии, такую, которая будет функционировать посредством квантовых эффектов, а не пренебрегать ими.

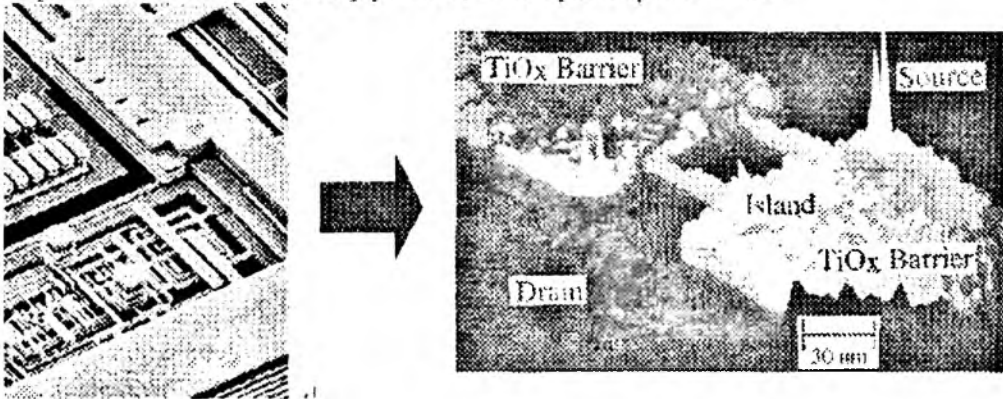


Рис 1

Переход от микротехнологии к нанотехнологии [14] продемонстрирован на рис. 1: слева – реальный чип IBM с характеристикой в 0,25 мкм. Производственная версия содержит около 200 миллионов транзисторов, справа – одноэлектронный транзистор (SET), который был создан с помощью острого (tip) сканирующего туннелирующего микроскопа (STM).

В соответствии с классической физикой не существует способа электрону перебраться от истока (source) к стоку (drain), из-за двух препятствий в виде барьеров по обе стороны "острова" (island). Но эта структура справа настолько мала, что может произойти квантовый эффект и электрон может, при некоторых обстоятельствах, туннелировать через барьеры (но только один электрон в заданное время!). Тем самым, одноэлектронный транзистор не будет работать без учета квантовой механики.

Это демонстрирует один из возможных способов создания транзисторов с наноразмерами, в основе работы которых используются квантовые эффекты.

Но вполне возможно, что лучше было бы отказаться от структуры типа транзисторов, а использовать совершенно новую архитектуру, более подходящую для нанометрического масштаба. Одна такая идея показана ниже. В качестве альтернативы использованию новых типов транзисторов, нанокomпьютеры могут иметь совершенно новый тип архитектуры, сделанный из множества простых квантовых ячеек, названных "сотами" [14].

На рис. 2 показано, как схема, названная "полусумматором" (слева на рис. 2), может быть реализована из двух типов сот (справа на рис. 2). Такой тип архитектуры очень подходит для нанометрического масштаба, при котором простые единицы формируются естественным образом.

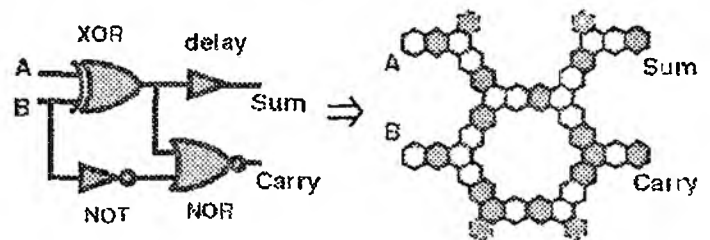


Рис 2

Одним из способов создания "сот" может быть использование структур, называемых квантовыми точками, известными так же, как "искусственные атомы"

Первое поколение будущих нанокomпьютеров может состоять из компонентов, которые будут вести себя в соответствии с квантовой механикой, но алгоритмы, по которым они будут работать, включать в себя квантовую механику, скорее всего, не будут. Мы можем называть такие компьютеры "нанометрическими классическими компьютерами" (слово "классический" означает "не квантовый")

Но недавно учёные пришли к выводу, что существует другой, возможно более конструктивный путь – квантовая механика может быть использована для создания алгоритмов абсолютно нового типа, которые будут мощнее, чем любая классическая схема. Компьютер, способный работать с такими алгоритмами будет самым настоящим "квантовым компьютером"

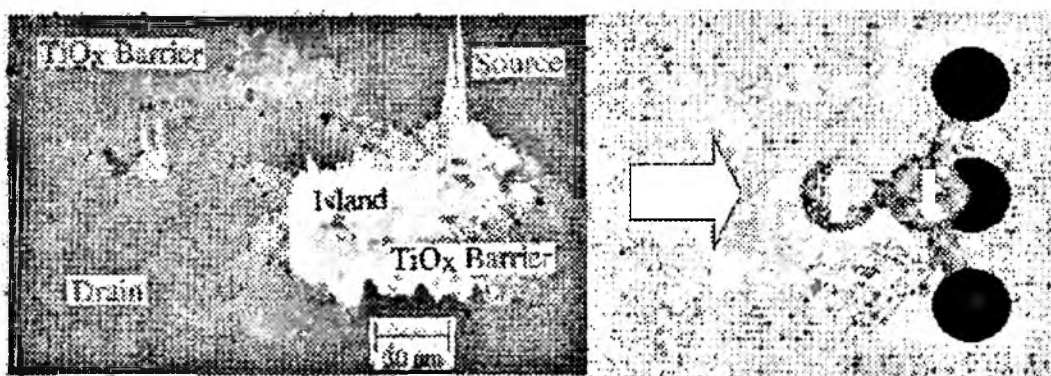


Рис. 3

От одноэлектронного транзистора рис. 3 (слева) перейдем к абсолютно новому компьютерному элементу – молекуле! Хотя обе эти структуры используют квантовую механику, только та, что показана на рис. 3 справа, может быть названа настоящим "квантовым компьютером". Ядра  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  в изотопически помеченном хлороформе ведут себя подобно маленьким магнитам и взаимодействуют с внешним магнитным полем. Ядерные спины могут содержать и обрабатывать информацию в так называемой квантовой суперпозиции.

Технически наиболее развито направление, в основе которого лежит использование электронных нанотранзисторов, в том числе одноэлектронных (SET, single-electron transistor), включая также транзисторы с поляризованными электронами (спинтронные транзисторы). В таких транзисторах уже достигнут квантовомеханический предел передачи классической информации, налагаемый принципом Паули и принципом неопределенности Гейзенберга. Достигнут также и уровень тепловыделения, определяемый принципом Ландауэра при потере бита информации в необратимых вычислениях. Несмотря на то, что до реального применения SET в компьютерной технике еще далеко, проработка различных архитектурных вариантов будущих нанокomпьютеров на их основе идет полным ходом. При этом роль физических критериев, определяющих границы реализуемости вычислительных структур, является, несомненно, определяющей.

Поскольку в ближайшие 15 лет количество транзисторов в интегральных схемах (ИС) будет и дальше увеличиваться, их элементы уменьшатся почти до размеров молекул.

Совершенно ясно, что достижение принципиального предела возможностей кремниевых транзисторов, т.е. уменьшение их функциональных элементов до 10 нм (около 30 атомов), немислимо без внедрения серьезных технологических новшеств.

Концепция нанотехнологий предусматривает применение атомов и молекул различных веществ в качестве проводников или даже законченных устройств.

Ученым предстоит разработать множество новых схем и решить большое количество проблем. Дело в том, что нанотехнологии оперируют квантовыми и молекулярными понятиями, где не действуют привычные макрофизические законы. В таких труднообразимых мас-

штабах элементы практически не имеют массы, а их основной показатель – это энергия. Ученым придется полностью перейти на работу с элементами квантовой физики и химии [15].

Сегодняшние процессоры уже имеют «на борту» более миллиарда транзисторов, но первые образцы наноструктур сразу же смогут увеличить это число примерно в 1000 раз.

Цель будущего десятилетия – создать процессор, имеющий более 1 триллиона транзисторов. Если самые первые кремниевые ИС изготавливались с минимальными размерами элементов в плоскости кристалла в несколько десятков микрон, то современная полупроводниковая технология на основе использования электронной и рентгеновской литографии, сфокусированных ионных пучков позволяет получать структуры с горизонтальными размерами менее 100 нм, а методы молекулярной эпитаксии обеспечивают уверенный контроль по составу и толщине слоев в 1–10 нм.

В перспективе возможно и дальнейшее продвижение в область малых горизонтальных размеров вплоть до структур, построенных из отдельных атомов или молекул на основе новых методов так называемой нанотехнологии с использованием, в частности, сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) в совокупности с методами химического осаждения, применением химического синтеза и методов молекулярной биологии. Это позволяет приступить к созданию устройств нанoeлектроники и молекулярной электроники и на их основе в ближайшей перспективе к созданию "нанометрических классических компьютеров".

Хотя принцип их работы не может быть понят без привлечения квантовых представлений, однако по-прежнему в нанoeлектронных компьютерах, как и в традиционных микроэлектронных компьютерах, обрабатывается информация, передаваемая некогерентными классическими сигналами, носителями которых являются электрические токи и напряжения. Такой компьютер можно рассматривать как электрическую схему, включающую совокупность микроскопических базисных нелинейных элементов – битов с только двумя возможными логическими булевыми состояниями "0" и "1" (binary digits e bits), логических элементов-вентилей и соединений между ними. Логическими состояниями битов могут быть, например, два значения тока в определенном проводнике или потенциала на нем, рассматриваемых как макроскопические классические величины – совокупность булевых состояний.

Несмотря на то, что в нанометрических компьютерах существенную роль начинают играть сугубо квантовые эффекты, такие как размерное квантование в низкоразмерных структурах, баллистический режим переноса носителей, кулоновская блокада, интерференция электронных волн в квантовых нитях, они в указанном выше смысле остаются классическими, при этом роль физических квантовомеханических критериев, определяющих границы реализуемости вычислительных структур, является, несомненно, определяющей.

Объемная плотность транзисторов в разрабатываемых интегральных наносхемах предельно высока. В таких условиях вопросы энергетики перспективного нанокomпьютера оказываются чрезвычайно важными. Существует фундаментальное ограничение плотности упаковки логических элементов, связанное уже не с атомной структурой вещества, а с термодинамикой вычислительного процесса как такового. Его суть выражается принципом Ландауэра, согласно которому потеря одного бита информации ведет к выделению тепловой энергии, равной  $kT \ln 2$ , где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура процессора [16]. В настоящее время рассматриваются различные пути решения проблемы перегрева процессора [17], например реализация обратимых вычислений. Это возможно при организации вычислительного процесса на основе принципов квантовой информатики.

### **Сквиды и их применение в радиотехнике и системах связи**

В 1911 г. Г. Камерлинг-Оннес, погрузив в жидкий гелий ртуть, открыл сверхпроводимость. Объяснение сверхпроводимости как квантового явления в макроскопическом масштабе было предложено [18] Ф. Лондоном в 1935 г. В 1950 г. Гинзбург и Ландау создали феноменологическую теорию сверхпроводимости, которая позволила глубоко понять природу этого явления. Они расширили теорию сверхпроводимости Ф. и Г. Лондонов, введя пространствен-

но-зависящий параметр  $\psi$ , который определяет меру упорядочения в сверхпроводящей фазе. Параметр порядка в теории Гинзбурга – Ландау является комплексным, и его можно рассматривать как волновую функцию “сверхпроводящих” электронов. В рамках этих представлений единая функция определяет макроскопическое число электронов, которые “сконденсированы” в одном и том же квантовом состоянии. Именно в этом смысле сверхпроводимость можно рассматривать как “квантовое макроскопическое состояние”. Таким образом, мы имеем дело с частицами с эффективной массой  $m^*$  и эффективным зарядом  $e^*$ , которые можно описывать как целое с помощью одной макроскопической волновой функции:

$$\psi = \rho^{1/2} e^{i\varphi}, \quad (9)$$

где  $\varphi$  – общая для всех частиц фаза, а  $\rho$  – их реальная плотность в макроскопическом состоянии. В соответствии с представлениями микроскопической теории сверхпроводимости, впервые сформулированной Бардиным, Купером и Шриффером [18, 19] в 1957, названной по первым буквам фамилий авторов БКШ, рассматриваемые “частицы” в действительности являются парами из связанных электронов. Такие пары получили название куперовских пар, в честь их первооткрывателя Купера. Заряд таких “частиц” равен удвоенному заряду электрона  $e^* = 2e$  ( $e$  – заряд электрона), а  $m^* = 2m$  ( $m$  – масса электрона). В 1972 г. Бардину, Куперу, Шрифферу за создание этой теории была присуждена Нобелевская премия.

Эти пары обладают нулевым суммарным спином и поэтому подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна. Если температура ниже  $T_c$  ( $T_c$  – критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние), такие частицы скапливаются (конденсируются) на самом нижнем энергетическом уровне (в основном состоянии). Чем больше их там соберется, тем труднее какой либо частице выйти из этого состояния. Для этого необходимо преодолеть энергию связи электронов в куперовской паре –  $2\Delta$ .

Все частицы при этом описываются единой волновой функцией или, иначе говоря, когерентны. Характерное расстояние между двумя электронами в куперовской паре, называемое длиной когерентности  $\xi$ , различно для разных сверхпроводников и может принимать значения 10 – 1000 нм. Сверхпроводящее состояние возникает скачкообразно при температуре  $T_c$ . Выше этой температуры металл или полупроводник находится в нормальном состоянии, а ниже ее – в сверхпроводящем.

Важнейшей особенностью связанного в пары коллектива электронов в сверхпроводнике является невозможность обмена энергией между электронами и решеткой малыми порциями, меньшими, чем энергия связи пары электронов. Это означает, что при движении электронов в кристаллической решетке не изменяется энергия электронов и вещество ведет себя как сверхпроводник с нулевым удельным сопротивлением. Квантово-механическое рассмотрение показывает, что при этом не происходит рассеяния электронных волн на тепловых колебаниях решетки или на примесях. Это означает отсутствие электрического сопротивления. Так как электрическое сопротивление равно нулю, то возбужденный в сверхпроводящем кольце ток будет существовать бесконечно долго.

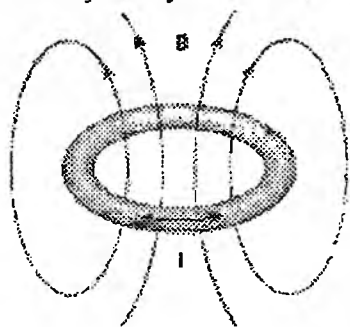


Рис. 4

Незатухающий ток и создаваемое им магнитное поле (рис. 4) не могут иметь произвольную величину, они квантуются так, что магнитный поток, пронизывающий кольцо, принимает значения [19] кратные элементарному кванту магнитного потока  $\Phi_0 = h/2e = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Вб}$ .

В отличие от электронов в атомах и других микрочастиц, поведение которых описывается квантовой теорией, сверхпроводимость – макроскопическое квантовое явление. Действительно, длина сверхпроводящей проволоки (рис. 4), по которой течет незатухающий ток, может достигать многих метров и даже километров. При этом носители тока в ней описываются единой волновой функцией.

Если взять два сверхпроводника, разделенных между собой достаточно тонким слоем диэлектрика (например, два металлических слоя, разделенных окислом), то в области барьера происходит перекрытие волновых функций куперовских пар. Образуется система из двух сверхпроводников, обладающих когерентными состояниями и называемых слабосвязанными сверхпроводниками.

Для такой системы скорость изменения волновой функции [20] на одной стороне перехода зависит от мгновенных значений волновых функций по обе стороны перехода:

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{\partial \Psi_1}{\partial t} &= E_1 \Psi_1 + K \Psi_2, \\ i\hbar \frac{\partial \Psi_2}{\partial t} &= E_2 \Psi_2 + K \Psi_1, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  – волновые функции сверхпроводников.  $E_1$  и  $E_2$  – собственные энергии сверхпроводников.  $K$  – матричный элемент, обеспечивающий связь между волновыми функциями системы.

Особенностью волновых функций двух слабосвязанных сверхпроводников является то, что они приближенно описывают состояния с макроскопическим заполнением:

$$\Psi_1 = \rho_1^{1/2} e^{i\varphi_1}, \quad \Psi_2 = \rho_2^{1/2} e^{i\varphi_2}.$$

Разность фаз  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  и напряжение между сверхпроводниками  $U = (E_1 - E_2)/(2e)$ .

Из уравнений (10) в случае двух одинаковых сверхпроводников ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ ) получаем:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\frac{\partial \rho_2}{\partial t} = \frac{2K}{\hbar} \rho \sin \varphi \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2e}{\hbar} U, \quad (12)$$

причем при постоянном напряжении  $U = U_0$ :

$$\varphi = U_0 \frac{2e}{\hbar} t + \varphi_0. \quad (13)$$

В этом случае ток между сверхпроводниками объемом  $V$  составит

$$i_s = 2eV \frac{\partial \rho}{\partial t} = I_m \sin \varphi = I_m \sin \left( \frac{2e}{\hbar} U_0 t + \varphi_0 \right). \quad (14)$$

Из выражения (12) следует, что, действительно, постоянный туннельный ток связанных пар

$$I_s = I_m \sin \varphi_0 \quad (15)$$

может возникнуть и при отсутствии напряжения на изолирующем барьере ( $U_0 = 0$ ). Это явление получило название стационарного эффекта Джозефсона. Из выражения (12) также следует, что при постоянном напряжении на контакте  $U_0 \neq 0$  в нем возникает переменный ток, частота которого  $\omega_0 = 2eU_0/\hbar$ . Это явление получило название нестационарного эффекта Джозефсона. Открытие этих явлений произошло в 1962 г.

Поскольку частоту тока можно измерить с большой точностью, эффект переменного тока теперь используется для высокоточной калибровки напряжений.

Однако самое распространенное практическое применение эффекта Джозефсона следует из другого эффекта квантовой механикой.

Если сделать небольшой сверхпроводящий контур с двумя встроенными переходами Джозефсона на каждом конце, а затем пропустить по нему ток, получим прибор под названием «сверхпроводниковый квантовый интерферометр», или СКВИД (от английского SQUID – Superconducting Quantum Interference Device). В зависимости от интенсивности внешнего магнитного поля ток в его цепи может изменяться от нуля (когда токи, идущие от двух пере-

ходов, взаимно гасятся) до максимума (когда они однонаправлены и усиливают друг друга) Максимальный ток кольца зависит от магнитного потока  $\Phi$  и определяется выражением

$$I_{\max} = 2 \cdot I_c \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{\Phi}{\Phi_0}\right), \quad (16)$$

где  $I_c$  – ток кольца,  $\Phi_0$  – квант потока,  $\Phi$  – захваченный поток

Сверхпроводниковый квантовый интерферометр – самый точный на сегодняшний день прибор для измерения магнитных полей, и при этом достаточно компактный.

На рис 5 показан двухконтактный интерферометр *а* – схема, *б* – зависимость критического тока от величины магнитного потока

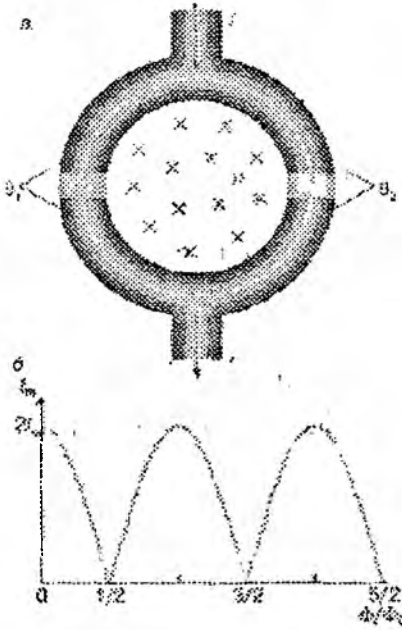


Рис 5

За теоретическое предсказание этих эффектов Брайану Д Джозефсону в 1973 г была присуждена Нобелевская премия

Последняя Нобелевская премия за работы в области сверхпроводимости была присуждена Й Г Беднорцу и К А Мюллеру в 1987 г за открытие нового класса высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) В настоящее время достигнута для соединения  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,d}$  критическая температура  $T_c$  порядка 135 К

Основные применения сквидов [21] определяются их уникальной чувствительностью

В первую очередь это применение в биологии и медицине магнитокардиография и магнитоэнцефалография Так, например, магнитокардиограф на основе сквида позволяет измерять бесконтактным образом кардиограмму сердца ребенка, находящегося в утробе матери, т. е. контролировать работу сердца ребенка задолго до его рождения

Современные многоканальные (до 200 каналов) томографы на основе сквидов, обладающие чувствительностью от 2 до 5  $\text{фТ/Гц}$ , позволяют бесконтактным образом получать детализированную информацию о картине магнитного поля и пространственной локализации его источников в мозге человека и животных В настоящее время наиболее высокая точность измерения физических величин имеет место для частоты  $\omega_0$  и достигает значения  $10^{-14}$ , в то время как существовавший ранее стандарт Вольта на элементах Вестона имел точность лишь на уровне  $10^{-6}$ . Резкое повышение точности воспроизведения напряжения 1 В стало возможным в стандартах Вольта на основе эффекта Джозефсона в силу существования фундаментального соотношения  $\omega_0 = 2eI_0/h$  между постоянной составляющей напряжения на джозефсоновском переходе и частотой джозефсоновской генерации (отношение между частотой генерации и приложенным постоянным напряжением  $\frac{\nu}{U_0} = 483,6 \text{ МГц/мкВ}$ ,  $\omega_0 = 2\pi\nu$ ).

Стандарт Вольта на одном джозефсоновском элементе дает выходное напряжение  $V \approx 1 \text{ мВ}$  При использовании цепочки из  $N \approx 1500$  последовательно включенных туннельных джозефсоновских переходов в Германии и США был реализован стандарт Вольта с выходным напряжением 1 В и точностью воспроизведения этого напряжения  $10^{-10}$

Генераторы и приемники субмиллиметрового диапазона длин волн, параметрические усилители, преобразователи частоты и детекторы – вот далеко не полный перечень других аналоговых устройств, успешно разрабатываемых на основе эффекта Джозефсона

Криогенные усилители радиочастотного диапазона на основе СКВИДов обладают рекордным значением шумовой температуры  $T_N \approx 50 \text{ мК}$  на частоте 0,5 ГГц при температуре

устройства 0,1 К, что в десятки раз меньше, чем достигнутое в настоящее время с использованием лучших охлаждаемых полупроводниковых усилителей с высокой подвижностью носителей.

На рис. 6 приведена одна из схем высокочувствительного усилителя радиочастотных сигналов на СКВИДе применяемого в ЯМР исследованиях.

Уникальными параметрами обладают также применяемые в СВЧ диапазоне параметрические сверхнизкошумящие джозефсоновские усилители. Шумовая температура  $T_N$  этих усилителей ниже физической, т. е. ниже 4,2 К при охлаждении жидким гелием.

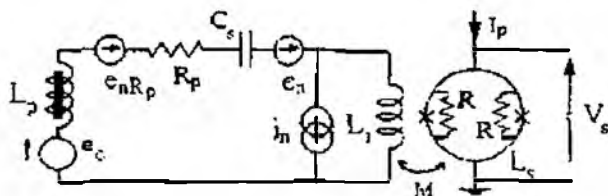


Рис 6

Что такое шумовая температура усилителя? Это температура, при которой спектральная плотность шумов резистора с сопротивлением равным входному сопротивлению усилителя, равна спектральной плотности шумов усилителя, приведенных к его входу. Для сравнения можно сослаться на такой широко известный СВЧ-усилитель, как лампа бегущей волны, который при комнатной температуре имеет шумовую температуру  $T_N \approx 104$  К (!).

Замена низкотемпературных сверхпроводников на высокотемпературные важна с точки зрения не только рабочих температур пассивных СВЧ-устройств, но и расширения рабочего диапазона частот до сотен гигагерц [22]. При этом использование сверхпроводимости приводит к малым потерям, практическому отсутствию дисперсии сигнала, возможности управлять параметрами устройств за счет изменения реактивных или резистивных свойств под внешним воздействием. Это распространяется на широкий спектр пассивных СВЧ-устройств: линии передач, линии задержек, полосовые фильтры, амплитудные и фазовые модуляторы, переключатели и ограничители СВЧ-мощности, малогабаритные антенны, как приемные, так и передающие, резонаторы и др. Разработаны, успешно испытаны и эксплуатируются сверхпроводниковые спутниковые системы связи, миниатюризированные и с повышенной пропускной способностью, системы связи с подвижными объектами третьего поколения, в которых применяются ВТСП-фильтры СВЧ-диапазона с уникальными характеристиками: шириной полосы пропускания 20 МГц, потерями на проход менее 0,5 дБ, затуханием вне полосы 85 дБ, крутизной склонов частотной характеристики 100 дБ/МГц и рабочей температурой 60 К. Кроме того, созданы системы перестраиваемых ВТСП-фильтров для локационной техники. Технология ВТСП-СКВИДов быстро совершенствуется. Вместе с тем, из-за проблемы температурных шумов НТСП-СКВИДы, работающие при 4,2 К, всегда будут иметь определенное преимущество перед СКВИДами, функционирующими при азотных температурах 77 К, но область использования ВТСП-СКВИДов значительно расширяется за счет упрощения эксплуатационных проблем. В этой связи интересными представляются разработки нового поколения магнитометрических систем неразрушающего контроля, необходимых, в первую очередь, атомной, авиационной и космической промышленности.

В настоящее время разрабатывается новая технология цифровых устройств на основе сверхпроводников – технология устройств быстрой одноквантовой (БОК) логики, которая по-английски называется rapid single flux quantum (RSFQ) logic. В таких цифровых устройствах носителями логической информации являются одиночные кванты магнитного потока  $\Phi_0$  и соответствующие им одноквантовые импульсы напряжения, генерируемые джозефсоновскими элементами при прохождении через них квантов магнитного потока. В качестве элементарных ячеек памяти в RSFQ-устройствах используются сверхпроводящие квантовые интерферометры с индуктивным параметром  $\ell > 1$ , при котором магнитный поток через интерферометр квантуется:  $\Phi \approx n\Phi_0$ .

Состояние  $n = 0$  соответствует хранению в такой ячейке логического нуля, а состояние  $n = 1$  – логической единицы. Для тактирования логических схем используется периодическая последовательность квантов  $\Phi_0$ , поступающих от тактового генератора ко всем логическим

устройствам. Поступление на вход логического устройства кванта магнитного потока  $\Phi_0$  в промежутке времени между двумя последовательными тактовыми импульсами означает, что на этот вход задана логическая единица. Отсутствие кванта  $\Phi_0$  означает задание логического нуля. Приход кванта магнитного потока на вход логического устройства сопровождается генерацией на его входном джозефсоновском элементе одноквантового импульса напряжения. Состояние «1» на выходе логического устройства соответствует генерации одноквантового импульса напряжения на выходном джозефсоновском элементе, в результате чего в цепь связи с другими логическими элементами будет направлен квант потока  $\Phi_0$ .

Тактовая частота в RSFQ-устройствах может достигать значения  $f_T \approx 0,1\tau^{-1}$ , где  $\tau$  – характерная длительность одноквантовых импульсов напряжения. К настоящему времени известны о создании сложных RSFQ-схем (рис. 7), например таких, как 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) или 16-канальный автокоррелятор для применений в радиоастрономии с тактовой частотой  $f_T \approx 20$  ГГц и степенью интеграции порядка  $10^4$  джозефсоновских переходов на один чип, или примерно  $10^3$  элементарных логических элементов.

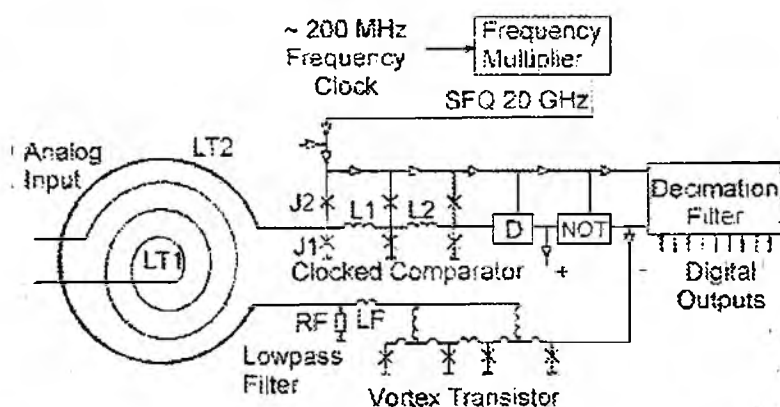


Рис. 7

Минимальное значение  $\tau$  ограничено фундаментальными свойствами сверхпроводящих материалов. Для ниобия, который используется в сверхпроводниковых схемах гелиевого уровня охлаждения,  $\tau_{min} \approx 0,7$  пс, и, следовательно, максимальное значение тактовой частоты может быть порядка 150 ГГц. При использовании в дальнейшем высокотемпературных сверхпроводников [19], таких как  $YBa_2Cu_3O_7$ , сохраняющих сверхпроводимость при температуре жидкого азота, минимальное значение длительности одноквантовых импульсов напряжения может быть около 0,1 пс. Это позволило бы поднять тактовую частоту RSFQ устройств до 1 ТГц. Диссипация энергии в RSFQ-устройствах пренебрежимо мала и составляет примерно  $10^{18}$  Дж/бит (энергия диссипации на одну логическую операцию), что примерно на пять порядков меньше, чем в полупроводниковых устройствах, где эта величина составляет  $10^{13}$  Дж/бит и является основным сдерживающим фактором повышения тактовой частоты полупроводниковых процессоров. Перспективными направлениями использования в ближайшем будущем сверхпроводниковых RSFQ-схем являются высокопроизводительные вычислительные системы и системы обработки изображений для широкого спектра задач в науке и технике, в том числе для создания систем сверхчеткого цифрового телевидения.

Возможности использования эффекта Джозефсона в сверхпроводниковой электронике не исчерпываются приведенными направлениями. Системы с джозефсоновскими переходами обладают уникальными физическими свойствами (джозефсоновская генерация, квантование магнитного потока, отрицательная индуктивность и т.д.), характеризуются чрезвычайно низким энерговыделением и малыми временами процессов переключения. Именно эти свойства позволяют создавать на их основе сверхпроводниковые аналоговые, аналого-цифровые и цифровые устройства, отличающиеся рекордно высокой чувствительностью и высокими значениями рабочих частот.

## Кубиты и квантовые компьютеры

Человечество с каждым днем производит все больше информации (в 2000 г. достижимая скорость канала – 10 Гбит/с, а к 2014 г. она будет на 3-4 порядка больше), поэтому необходим рост вычислительных возможностей, примерно так, как это предусмотрено Законом Мура (G Moore). Согласно этому закону, начиная с изобретения первого планарного транзистора в 1959 г., число транзисторов в кристалле одной интегральной схемы (ИС) в течение первых 15 лет удваивалось каждый год, а затем и до сих пор такое удвоение происходит за 1,5 года. По экспоненциальному закону уменьшаются со временем и характерные размеры элементов ИС (в два раза за каждые 1,5 года).

Прогресс микроэлектроники и вычислительной техники до недавнего времени виделся только на пути дальнейшего увеличения степени интеграции, быстродействия интегральных схем и использования логически обратимых вентилей. Однако в соответствии с законом Мура размеры транзисторов быстро уменьшаются, и к 2020 г. транзисторы должны иметь размеры отдельных атомов (рис. 8).

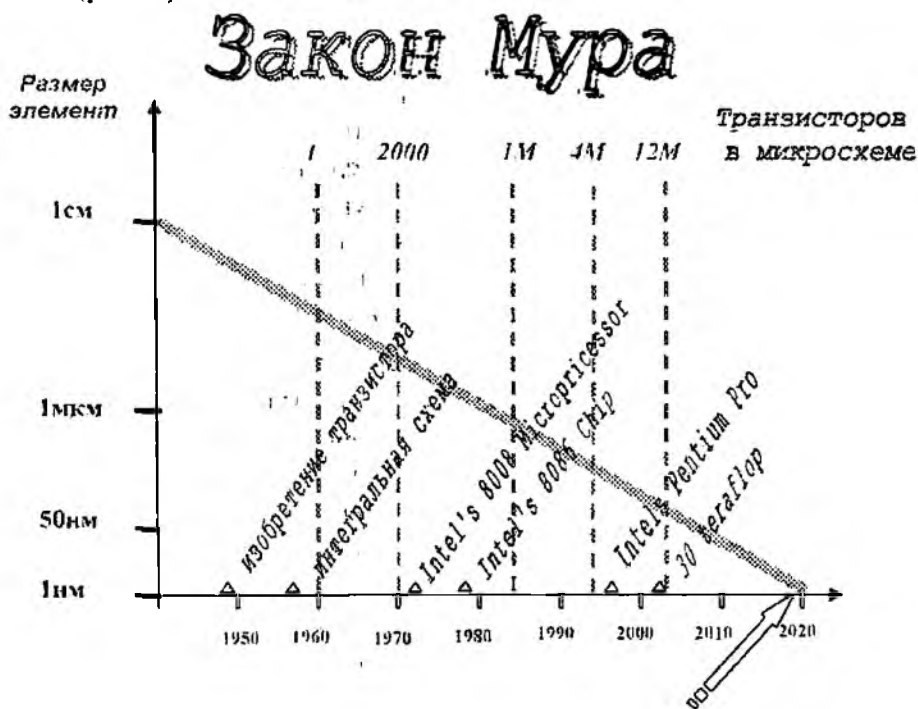


Рис. 8

Дальнейшее развитие информационных технологий требует новых необычных подходов к решению проблемы.

Кардинально новые идеи и принципы построения вычислительных устройств должны были прийти из других областей физики, подобно тому, как в электронику из физики полупроводников пришел принцип действия полупроводникового транзистора, на основе которого были построены различные логические элементы и элементы памяти.

Такой новой оказалась идея о квантовых вычислениях, впервые высказанная математиком Ю. И. Маниным в 1980 г. [23], и которая стала активно обсуждаться лишь после опубликования в 1982 г. статьи американского физика-теоретика, нобелевского лауреата Р. Фейнмана [24]. Поясним эту идею.

Любая классическая двухуровневая система, как и квантовая, имеет основное  $|0\rangle$  и не основное  $|1\rangle$  базисные состояния. Примером классической двухуровневой системы является известный в микроэлектронике инвертор, осуществляющий операцию НЕ. В зависимости от того, заняты ли эти состояния с вероятностями  $P(0) = 1, P(1) = 0$  или  $P(0) = 0, P(1) = 1$ , мы имеем булевы логические состояния "0" или "1".

В квантовом случае возникает намного более богатая ситуация [25, 26]. Волновая функция квантовых состояний двухуровневой системы – квантового бита, получившего в дальнейшем название *кубита* (quantum bit или qubit), может представлять собой *суперпозицию* базисных состояний (вектор состояния) вида  $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , где  $\alpha, \beta$  – комплексные амплитуды состояний, при этом  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ . Помимо вероятностей  $P(0) = |\alpha|^2$  и  $P(1) = |\beta|^2$ , заполнения базисных состояний  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ , состояние кубита характеризуется *когерентными* или *интерференционными* слагаемыми вероятности состояния  $|\psi\rangle$ , определяемыми произведениями комплексных амплитуд  $\alpha\beta^*$  и  $\alpha^*\beta$ . Состояние квантового бита в отличие от классического может изменяться не только путем изменения вероятностей  $P(0)$  и  $P(1)$ , но и более тонко – путем изменения амплитуд состояний  $\alpha$  и  $\beta$ , что соответствует поворотам вектора состояния  $|\psi\rangle$  в так называемом гильбертовом пространстве состояний.

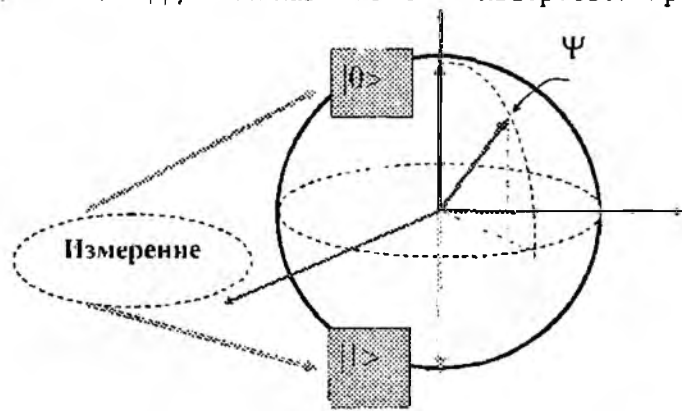


Рис 9

Как и классический бит, кубит олицетворяет единицу или ноль. Однако в квантовой механике любому объекту непременно свойствен диапазон суперпозиций, содержащих в разной степени оба исходных состояния. Поэтому значения кубита как бы соответствуют точкам на поверхности сферы, где 0 и 1 – южный и северный полюсы (см рис 9). Наличие континуума состояний между 0 и 1 – причина многих необычных свойств квантовой информации.

Ю. И. Манин и Р. Фейнман обратили внимание на способность изолированной квантовой системы из  $L$  двухуровневых квантовых элементов находиться в когерентной суперпозиции из  $2^L$  булевых состояний, характеризующейся  $2^L$  комплексными числами и увеличенной до  $2^L$  размерностью соответствующего гильбертова пространства.

Ясно, что для описания такого квантового состояния в классическом вычислительном устройстве потребовалось бы задать  $2^L$  комплексных чисел, то есть понадобились бы экспоненциально большие вычислительные ресурсы. Уже для  $L = 100$  их число исключительно велико –  $2^{100}$ , т.е. порядка  $10^{30}$  ( $2^{500} \cong$  число атомов во Вселенной)!

Отсюда был сделан обратный вывод о том, что эффективное численное моделирование квантовых систем, содержащих до сотни двухуровневых элементов, практически недоступно классическим компьютерам, но может эффективно осуществляться путем выполнения логических операций на квантовых системах, которые действуют на суперпозиции многих квантовых состояний и этим принципиально отличаются от операций над булевыми состояниями [23, 24].

Суперпозицией квантовых состояний называют такое состояние электрона, когда он находится сразу в нескольких точках пространства, это состояние описывают обычно волновой

функцией 
$$\Psi_s = \sum_{n=1}^N c_n \Psi_n.$$

То есть электрон (или любой другой квантовый объект) частично будет находиться в одной точке, частично в другой, частично в третьей и т.д. Это не означает, что он делится на дольки, как апельсин. Если бы так, тогда можно было бы надежно изолировать какую-нибудь часть электрона и измерить ее заряд или массу. Но опыт показывает, что после измерения электрон всегда оказывается "целым и невредимым" в одной-единственной точке, несмотря на то, что до этого он успел побывать одновременно почти везде. Модуль значения волновой функции в любой точке, возведенный в квадрат, определяет вероятность нахождения частицы в этой точке в данный момент. После измерения положения частицы ее волновая функция как бы стягивается (коллапсирует) в ту точку, где частица была обнаружена, а затем опять начинает расплываться. Свойство квантовых частиц быть одновременно

во многих состояниях, называемое квантовым параллелизмом, может быть успешно использовано в квантовых вычислениях [27, 28].

Простейшим случаем двухуровневой квантовой системы является спин ядра атома или электрона  $I = 1/2$  в постоянном внешнем поле  $B_0$ , два уровня энергии и состояния соответствуют проекциям спина на направление  $B_0$  (рис. 10). Состояния спина  $I_z = \pm 1/2$ , и его уровни энергии  $E_{\pm} = \pm \mu_B B_0 / 2$  во внешнем поле  $B_0$  представляют логические состояния кубита  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ .

В качестве двух состояний кубита также могут быть выбраны два оптических уровня энергии и состояния электрона в ионе (рис. 11)

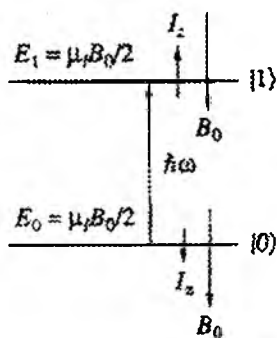


Рис. 10

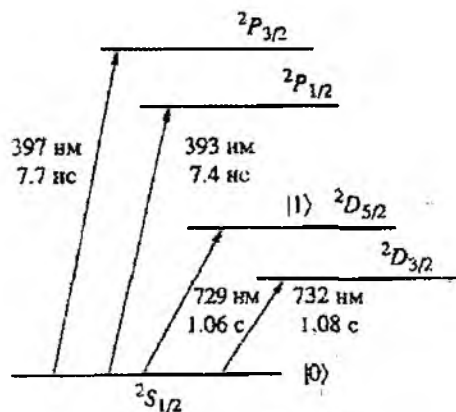


Рис. 11

Состояния иона  $\text{Ca}^+$ , соответствующие уровням энергии  $^2S_{1/2}$  (основной) и  $^2D_{5/2}$  (метастабильный) выбраны за логические  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$

Числа у стрелок показывают длину волны лазера, вызывающего переход, и время жизни иона на соответствующем уровне

Двум значениям кубита могут соответствовать, например, основное и возбужденное состояния атома, направления вверх и вниз спина атомного ядра, направление тока в сверхпроводящем кольце, два возможных положения электрона в полупроводнике и т. п.

Несколько вариантов реализации кубитов показаны на рис. 12 – 16

– рис. 12 – 7-кубитовая молекула, созданная в фирме IBM,

– рис. 13 – ионная ловушка как квантовый процессор. В линейной структуре благодаря взаимному отталкиванию ионы находятся на расстоянии  $\sim 20$  нм. Каждый ион адресуется парой лазерных лучей и представляет собой кубит,

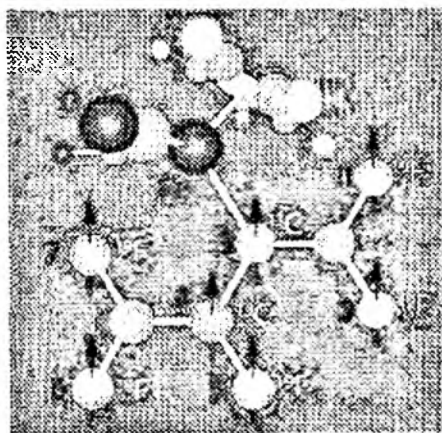


Рис. 12

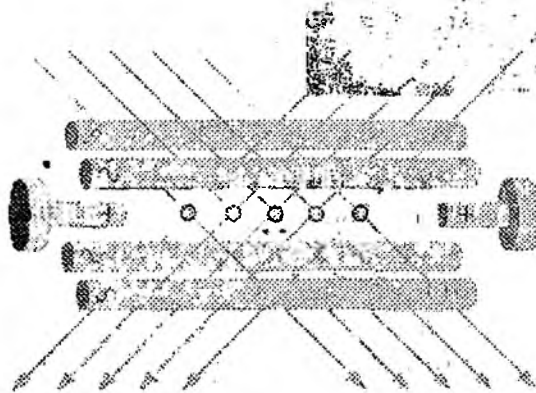


Рис. 13

– рис. 14 – схематическое изображение двух ячеек Кейна в кремниевой матрице с ядрами с иннами-кубитами донорных атомов фосфора. При температурах менее 1 К ядерные спины имеют очень большое время (часы и дни) сохранения исходных состояний квантового регистра,

– рис. 15 – два кубита типа "куперовская пара в коробке". На данной структуре удалось продемонстрировать образование запутанного состояния (entangled state) между двумя твердотельными сверхпроводниковыми кубитами на джозефсоновских контактах;

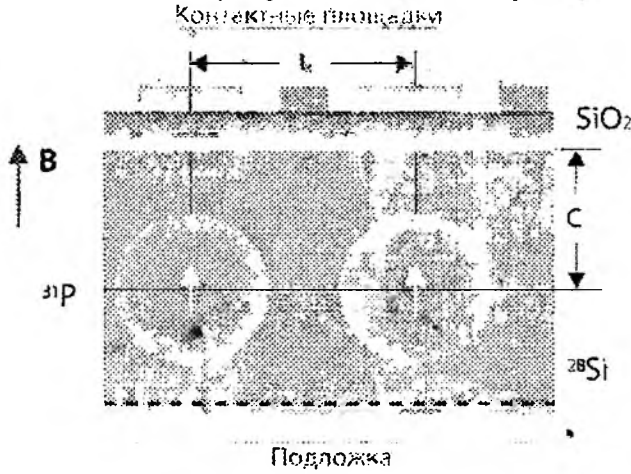


Рис 14

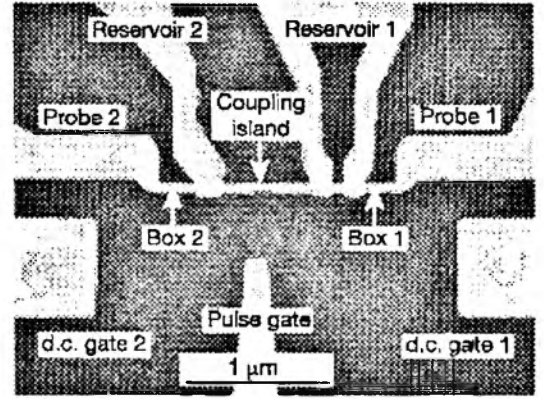


Рис 15

– рис. 16 – квантовые точки – что-то вроде искусственных атомов, только крупнее. Представляют собой 12-нм кристаллики арсенида индия в матрице арсенида галлия-алюминия. При возбуждении лазером квантовые точки испускают два перепутанных фотона.

Квантовый регистр устроен почти так же, как и классический. Это цепочка квантовых битов, над которыми можно проводить логические операции (подобно применению операций НЕ, ИИ-НЕ и т.п. в классическом регистре). На рис. 17 показана схема квантового регистра, в котором одно- или двухбитовые квантовые вентили (NOT 1/2, NOT, CNOT и др.) осуществляют логические операции над кубитами или парами кубитов.

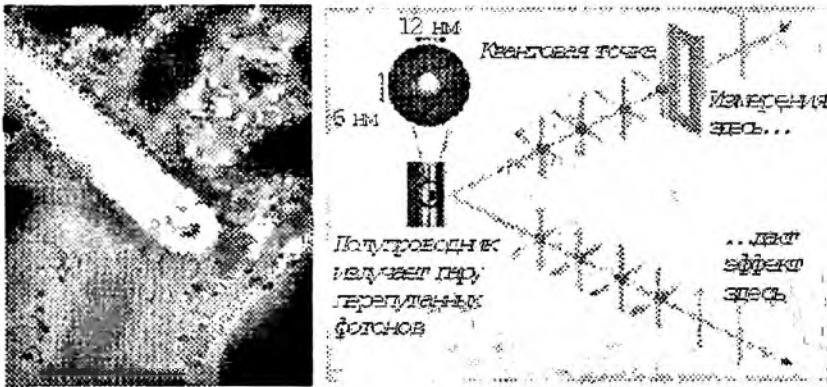


Рис 16

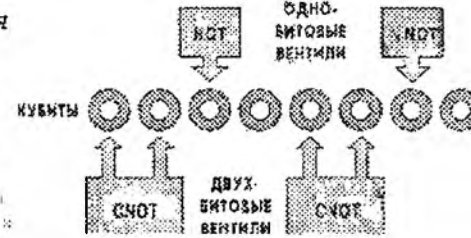


Рис 17

К базовым состояниям квантового регистра, образованного  $L$  кубитами, относятся как же, как и в классическом, все возможные последовательности нулей и единиц длиной  $L$ .

Всего может быть  $2^L$  различных комбинаций. Их можно считать записью чисел в двоичной форме от 0 до  $2^L - 1$  и обозначать  $0, 1, 2, 3, \dots, 2^L - 1$ .

Однако эти базовые состояния не исчерпывают всех возможных значений квантового регистра (в отличие от классического), поскольку существуют еще и состояния суперпозиции, задаваемые комплексными амплитудами, связанными условием нормировки. В качестве примера на рис. 18 показаны состояния классического и квантового трехразрядных регистров. В отличие от классического регистра находящегося в одном заданном состоянии, квантовый регистр находится в восьми состояниях одновременно.

Классического аналога у большинства возможных значений квантового регистра (за исключением базовых) просто не существует. Состояния классического регистра – лишь мизер всего богатства состояний квантового компьютера.

Допустим, что на регистр осуществляется внешнее воздействие, например, в часть пространства поданы электрические импульсы или направлены лазерные лучи. Если это классический регистр, импульс, который можно рассматривать как вычислительную операцию, изменит  $L$  переменных. Если же это квантовый регистр, то тот же импульс может одновременно преобразовать до  $2^L$  переменных.

Классический регистр      Квантовый регистр

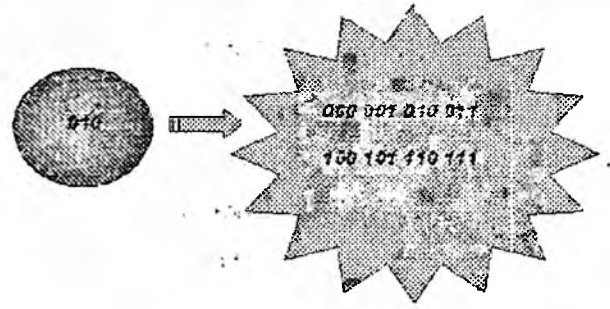


Рис 18

Таким образом, квантовый регистр, в принципе, способен обрабатывать информацию в  $2^L$  раз быстрее по сравнению со своим классическим аналогом. Отсюда видно, что маленькие квантовые регистры ( $L < 20$ ) могут служить лишь для демонстрации отдельных узлов и принципов работы квантового компьютера, но не принесут большой практической пользы, так как не сумеют обогнать современные ЭВМ, а стоить будут заведомо дороже. В действительности квантовое ускорение обычно значительно меньше, чем приведенная грубая оценка сверху (это связано со сложностью получения большого количества амплитуд и считывания результата), поэтому практически полезный квантовый компьютер должен содержать тысячи кубитов. Но, с другой стороны, понятно, что для достижения действительного ускорения вычислений нет необходимости собирать миллионы квантовых битов. Компьютер с памятью, измеряемой всего лишь в килокубитах, будет в некоторых задачах несоизмеримо быстрее, чем классический суперкомпьютер с терабайтами памяти.

Схема идеального квантового компьютера [27, 28] представлена на рис 19. По существу квантовый компьютер представляет собой регистр из  $n$  кубитов, управляемых внешними классическими сигналами. Квантовый компьютер встроен в классическое окружение, состоящее из управляющего классического компьютера и генераторов импульсов, управляющих эволюцией кубитов. В ходе вычислений к регистру  $n$  можно добавить другие регистры, играющие вспомогательную роль.

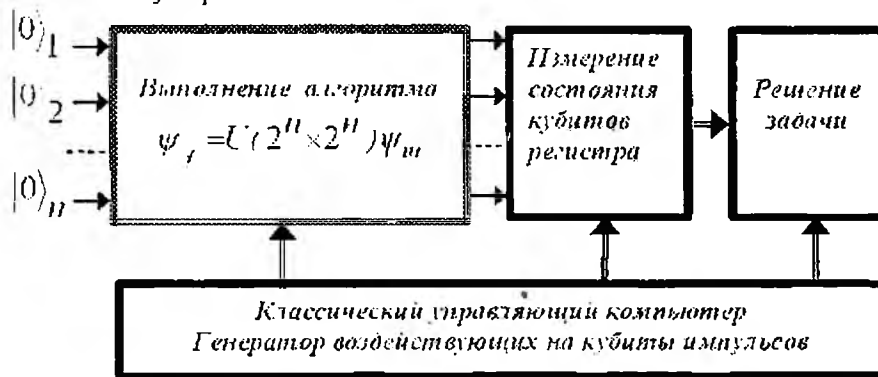


Рис 19

Назовем идеальным квантовый компьютер, состояния которого всегда когерентны [28]. Это означает, во-первых, отсутствие взаимодействия компьютера с окружением, создающим шум и нарушающим когерентность вектора состояния компьютера (декогерентизация), во-вторых, в идеальном квантовом компьютере внешние сигналы осуществляют точное управление. Поясним состояние информативности компьютера.

Вектор состояния  $|\psi\rangle$  квантового регистра из  $n$  кубитов представляет собой разложение по  $2^n$  базисным состояниям регистра  $|i_1 \dots i_n\rangle, i_1, \dots, i_n = \{0, 1\}$ .

$$|\psi\rangle = \sum_{i_1 \dots i_n} \alpha_{i_1 \dots i_n} |i_1 \dots i_n\rangle. \quad (17)$$

Здесь суперпозиция  $|\psi\rangle$  является вектором в  $2^n$ -мерном векторном пространстве,  $\{|i_1 \dots i_n\rangle\}$  –  $2^n$  базисных векторов (ортов) этого пространства,  $\alpha_{i_1 \dots i_n}$  – проекции вектора  $|\psi\rangle$  на направления ортов  $\{|i_1 \dots i_n\rangle\}$ . Все, что можно знать о физической системе, содержится в ее векторе состояния  $|\psi\rangle$ . Все, что можно сделать с системой, – это преобразовать ее начальный вектор состояния  $|\psi_m\rangle$  в другой вектор:  $|\psi_f\rangle$ . Поэтому процесс вычислений на квантовом компьютере рассматривается как преобразование начального вектора состояния компьютера  $|\psi_m\rangle$  в конечный вектор состояния  $|\psi_f\rangle$  путем умножения вектора  $|\psi_m\rangle$  на унитарную матрицу  $U$  размерности  $2^n \times 2^n$ :

$$|\psi_f\rangle = U(2^n \times 2^n)|\psi_m\rangle \quad (18)$$

Удобно полагать, что в начальном состоянии все кубиты компьютера находятся в состоянии  $|0\rangle$ :  $|\psi_m\rangle = |0_1 \dots 0_n\rangle$ .

Эту операцию называют инициализацией. Состояние  $|0_1 \dots 0_n\rangle$  можно получить охлаждением кубитов до сверхнизких температур или путем измерения и управления состоянием кубитов. Алгоритм решения задачи заключен в матрице преобразования  $U(2^n \times 2^n)$ . Классическая информация о решении задачи содержится в конечном векторе состояния  $|\psi_f\rangle$ , она должна быть получена измерением кубитов.

Для решения задачи на квантовом компьютере надо изготовить необходимое количество кубитов, инициализировать их, управлять их квантовой эволюцией, выполнить преобразование  $U|\psi_m\rangle$  и измерить состояния кубитов, описываемых вектором  $|\psi_f\rangle = U|\psi_m\rangle$ . Рассмотрим вопрос о ресурсах квантового компьютера, дающих ему преимущества по сравнению с классическим компьютером.

Анализ ресурса квантового компьютера проведем исходя из уравнения (18). Введем сначала более экономные обозначения вектора состояния  $|\psi\rangle$ . Базисное состояние  $\{|i_1 \dots i_n\rangle\}$  представляет собой  $n$ -разрядное двоичное число  $|x\rangle$ , разряды которого совпадают с числами

$$i_1, \dots, i_n = \{0, 1\}. \text{ В этих обозначениях } |\psi\rangle = \sum_{x=0}^{2^n} \alpha_x |x\rangle.$$

Суперпозиция  $|\psi\rangle$  содержит  $2^n$  слагаемых, представляющих собой разложение вектора  $|\psi\rangle$  по базисным функциям  $|x\rangle$ ,  $0 \leq x \leq 2^n - 1$ . Ограниченный физический ресурс, т.е. небольшое количество  $n \cong 10^3$  частиц (кубитов), создает экспоненциально большой  $2^n = 2^{1000} \cong 10^{300}$  математический информационный ресурс квантового компьютера.

Следствием принципа суперпозиций является  $2^n$  – кратный квантовый параллелизм вычислений. Действительно, изменение состояния только одного кубита, перестраивает всю суперпозицию. (Поскольку набор базисных функций  $|x\rangle$  постоянен, перестраиваются все  $2^n$  проекций  $\alpha_x$  вектора  $|\psi\rangle$ ).

Стоит, однако, отметить, что существует класс задач, для которых квантовые алгоритмы не дают значительного ускорения по сравнению с классическими. Одним из первых это показал Ю. Ожигов, построивший ряд примеров алгоритмов, принципиально не ускоряемых на квантовом компьютере ни на один такт.

И тем не менее, нет сомнения, что компьютеры, работающие по законам квантовой механики. – новый и решающий этап в эволюции вычислительных систем. Осталось только их построить.

Канадская компания D-Wave в середине февраля 2008 г. продемонстрировала первую модель квантового компьютера *Orion* в Компьютерном музее в Калифорнии (Computer History Museum in Mountain View).

Компьютер D-Wave's построен на кремниевом чипе, который содержит 16 кубитов (эквивалентных битам в обычном компьютере), соединенных друг с другом. Каждый кубит состоит из кристалла ниобия, помещенного в катушку индуктивности.

На рис. 20 показаны элементы квантового компьютера *Orion* компании D-Wave: *a* – квантовый процессор в сборе, *б* – электронные модули для связи с квантовым чипом, *в* – кремниевый квантовый чип с 16 кубитами.

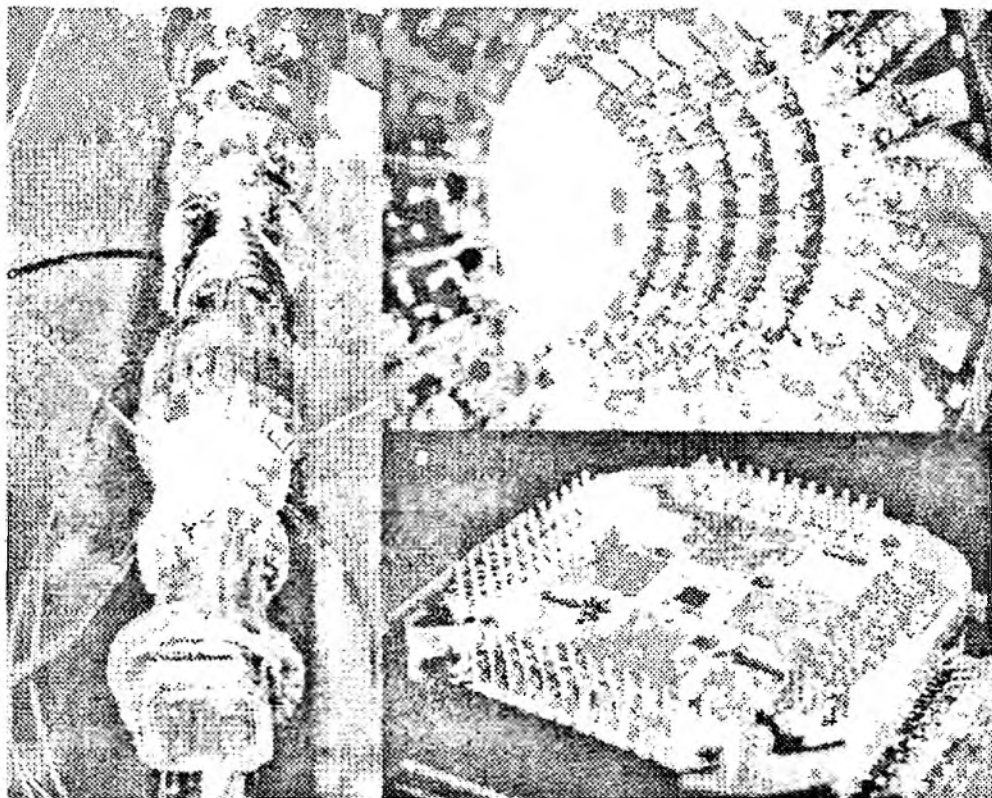


Рис 20

Электрический ток, протекающий по катушке, генерирует магнитное поле, а оно, в свою очередь, вызывает изменение состояния кубита. Поскольку известно, как ниобий реагирует на магнитные поля, и параметры магнитных полей можно легко измерить, то их изменения, вызванные ниобием, могут быть переведены в результат, который и является решением задачи.

В процессоре квантового компьютера «*Orion*» кубитами являются группы электронов в виде элементов из алюминия и ниобия, охлажденных жидким гелием до температуры, близкой к абсолютному нулю ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ).

Компания D-Wave показала работу «квантового компьютера». Сам компьютер пока не доступен для изучения, есть только его снимки, а работа системы была продемонстрирована удаленно, с использованием средств видеотрансляции.

Примечательно, что вопреки громогласным утверждениям из официального пресс-релиза, руководитель D-Wave, Херб Мартин (Herb Martin) подчеркнул, что созданная система не является настоящим квантовым компьютером, а скорее может быть названа специализированной машиной, которая использует «немного квантовой механики» для решения задач. По оценкам специалистов полноценный квантовый компьютер может быть построен не ранее чем через 20 – 30 лет.

С наступлением эры квантовых компьютеров, квантовый компьютер не сменит традиционный – у них разные задачи и возможности.

### Квантовые информационные системы и квантовая “телепортация”

Одним из основных мотивов для проявления усиленного интереса различных государственных и бизнес-структур к развитию исследований в области квантовых информационных технологий явились в конце 90-х годов XX века публикации в прессе о возможности создания квантового устройства способного за считанные секунды взломать любой ключ для шифрования информации. Следует отметить интересный факт, что по числу продаж, самую распространенную операционную систему Microsoft Windows, опережает скромный продукт фирмы RSA Data Security Inc. – программа, реализующая алгоритм шифрования с открытым ключом RSA, названный как в честь его авторов – американских математиков Ривеста, Шамира и Адельмана. На сегодняшний день фирма RSA Data Security, Inc. продала уже более 450 миллионов лицензий.

В алгоритме RSA используется следующая важная гипотеза. Если имеется два больших (требующих более сотни десятичных цифр для своей записи) простых числа  $M$  и  $K$ , то найти их произведение  $N = MK$  не составит большого труда. А вот решить обратную задачу, то есть, зная большое число  $N$ , разложить его на простые множители  $M$  и  $K$  (так называемая задача факторизации) – практически невозможно. Именно с этой проблемой столкнется злоумышленник, решивший “взломать” алгоритм RSA и прочесть зашифрованную с его помощью информацию: чтобы узнать закрытый ключ, зная открытый, придется вычислить  $M$  или  $K$ .

Для проверки справедливости гипотезы о практической сложности разложения на множители больших чисел проводились и до сих пор еще проводятся специальные конкурсы. Рекордом считается разложение всего лишь 155-значного (512-битного) числа. Вычисления велись параллельно на многих компьютерах в течение семи месяцев 1999 г. Если бы эта задача выполнялась на одном современном персональном компьютере, потребовалось бы примерно 35 лет машинного времени. Расчеты показывают, что с использованием даже тысячи современных рабочих станций и лучшего из известных на сегодня вычислительных алгоритмов одно 250-значное число может быть разложено на множители примерно за 800 тысяч лет, а 1000-значное – за  $10^{25}$  лет.

Поэтому криптографические алгоритмы, подобные RSA, оперирующие достаточно длинными ключами, считались абсолютно надежными и использовались во многих приложениях. Оказывается, используя квантовые компьютеры, не составит большого труда такой ключ вскрыть. Согласно оценкам, квантовый компьютер с памятью объемом всего лишь около 10 тысяч квантовых битов способен разложить 1000-значное число на простые множители в течение всего нескольких часов.

Известно два примера нетривиальных задач, в которых квантовые компьютеры дают радикальный выигрыш. Первый из них – задача разложения целых чисел на простые множители (факторизация чисел) и, как следствие, вычисления дискретного логарифма.

Именно для него есть эффективный квантовый алгоритм. Его придумал Шор [29] в конце 1994 г. Шор использовал следующую идею. Рассмотрим базис в фазовом пространстве. Он состоит из классических состояний. Но в линейном пространстве много базисов. Мы можем найти некий оператор, с помощью которого можно найти другой базис; и перейти к нему. Выполнить там какие-то вычисления, вернуться обратно и получить нечто совершенно отличное от того, что мы имели бы в классическом базисе. Шор именно эту идею и реализовал. Причем преобразование оказалось такое, которое и в физике, и в математике имеет принципиальное значение – дискретное преобразование Фурье.

Для вычисления задач разложения целого числа на множители, записанного  $N$  битами, нужно потратить  $N^3$  единиц времени. Это вполне реализуемо на квантовом компьютере, что ведет к разрушению безопасности и делает бесперспективными криптографические алгоритмы, подобные RSA.

Вторая задача предложена Гровером (L. Grover) [30]. Рассмотрим базу данных, содержащую  $2^N$  записей. Мы хотим найти ровно одну запись. Имеется некая процедура определения того, нужную запись мы взяли или нет. Допустим записи не упорядочены, возникает вопрос: с какой скоростью мы можем решить эту задачу на обычном компьютере? В худшем случае нам придется перебрать все  $2^N$  записей. Оказывается, что на квантовом компьютере достаточно числа запросов порядка корня из числа записей –  $2^{N/2}$ . На сегодняшний день только эти два алгоритма эффективны для квантовых систем. Возможно в ближайшее время будут открыты и другие.

В классической криптографии, где используется различная математическая техника для предотвращения перехвата противником содержимого зашифрованных сообщений, безопасность информации не может быть гарантирована, в то время как в квантовой механике информация охраняется законами физики. Принцип неопределённости Гейзенберга и квантовое переплетение могут быть использованы в системах безопасной связи, часто называемых "квантовой криптографией". Квантовая криптография обеспечивает способ обмена между двумя группами ключей для шифрования с абсолютной защищённостью канала связи.

Существует, по крайней мере, три основные квантовые криптографические системы:

1. Криптосистемы с кодированием, основанным на двух некокоммутируемых исследуемых, предложенные Визнером (S. Wiesner в 1970 г., а также Беннетом (С. Н. Bennet) и Brassардом (G. Brassard) в 1984 г.

2. Криптосистемы с кодированием, построенным с использованием квантового переплетения и теоремы Белла, предложенные Артуром Экертом (Arthur Ekert) в 1990 г.

3. Криптосистемы с кодированием, основанным на двух перпендикулярных векторах состояния, предложенные Беннетом (С. Н. Bennet) в 1992 г.

Квантовые криптосистемы первого типа можно пояснить на простом примере. Система включает в себя передатчик и приёмник. Отправитель может использовать приёмник для отсылки фотонов с одной из четырёх поляризаций: 0, 45, 90 и 135 градусов. Получатель на другом конце использует приёмник для измерения поляризации. Согласно законам квантовой механики получатель может различить только линейную поляризацию (0 и 90), или же его можно быстро перестроить для распознавания диагональной поляризации (45 и 135); однако он никогда не сможет различать оба типа. Передача ключа требует несколько этапов. Отправитель отсылает фотоны в одном из четырёх состояний поляризации, выбираемых случайным образом. Для каждого из присылаемых фотонов получатель использует случайный тип измерения: или линейный, или диагональный. Получатель записывает результаты измерения и держит их в секрете. После этого получатель публично объявляет тип измерения (но не результаты), и отправитель сообщает получателю, какие из измерений были нужного типа. Две группы (получатель и отправитель) сохраняют у себя результаты, получившиеся при нужном типе измерения. Эти результаты затем переводятся в биты (1 и 0), тем самым становясь ключом. Если подслушивающий попытается перехватить сообщение, то он внесёт в него ошибки, потому что не может знать истинный тип поляризации каждого фотона, а квантовая механика не позволяет получать точное значение двух некокоммутирующих исследуемых (в данном случае – линейная и диагональная поляризации). Два пользователя квантового канала тестируют на предмет подслушивания путём открытия случайной подгруппы бит ключа и проверки частоты ошибок. И хотя они не могут предотвратить подслушивания, любая попытка перехватить сообщение будет замечена. Если секретность канала связи их не удовлетворила, они могут попытаться передать ключ снова.

Основная идея криптосистем второго типа следующая. Генерируется последовательность взаимосвязанных пар частиц, и каждая сторона выбирает себе по каждой частице из пары (например, пары так называемых фотонов Эйнштейна – Подольского – Розена, поляризация которых меряется партиями). При таком типе связи подслушивающему придётся обнаружить частицу для того, чтобы прочитать сигнал и после передать её для того, чтобы не обнаруживать своё присутствие. Однако акт обнаружения одной частицы из пары уничтожит

взаимосвязь с другой частицей, и две стороны могут легко проверить, произошёл ли перехват, без открытия результатов своих измерений, используя обычный канал связи.

Схема измерения поляризации фотона была испытана в лаборатории Исследовательского Центра ИВМ имени Томаса Джей Уотсона на сборке системы с квантовым ключом первого типа и позволила передачу ключа на расстояние в 30 см со скоростью 10 бит в секунду. Дальнейшие достижения в квантовой оптике дали новые источники фотонов, новые фотодетекторы, и лучшие оптические волокна – компоненты, у которых есть потенциал для проявления важных квантовых феноменов на больших расстояниях. Например, схема, основанная на поляризации, была успешно протестирована на дистанции 1 км, квантовое переплетение было протестировано на дистанции 4 км, а интерференция отдельных частиц дала результат на дистанции более 10 км оптического кабеля. Это позволяет оптимистично смотреть на внедрение систем с безопасной передачей ключа на довольно большой территории, передавая ключ со скоростью 20 бит в секунду.

Фундаментальные различия между классическим и квантовым мирами можно выразить двумя понятиями: дополнительность и сцепленность. Дополнительность приводит к тому, что состояния квантовой системы не могут быть заданы простым перечислением свойств, т.е. точкой в каком-либо фазовом пространстве. Вместо этого состояния описываются векторами в некотором линейном (гильбертовом) пространстве, причем всякая суперпозиция (линейная комбинация) векторов также задает состояние.

В мире микроскопических объектов, описываемых квантовой механикой, вещи не всегда бывают такими простыми. Представьте атом, который может подвергнуться радиоактивному распаду в определённое время, а может и не подвергнуться. Можно полагать, что, при всём уважении к распаду, существуют только два возможных состояния: "распался" и "не распался". Однако в квантомеханическом мире атом может также существовать в комбинированном состоянии "распался – не распался", при котором он находится ни в том, ни в другом состоянии, а где-то посередине. Это называется "суперпозицией" двух состояний, и оно не является чем-то, что может быть применено к классическим объектам, вроде пистолетов или служащих. Два атома могут взаимодействовать таким образом, что если один распадётся, то второй также распадётся, или если первый атом не распадётся, то и второй тоже не распадётся. Это называется 100 % корреляцией (взаимодействием). Но квантомеханические атомы могут также взаимодействовать таким образом, что если первый находится в суперпозиции "распался – не распался", то второй будет также находиться в той же суперпозиции. Квантомеханически существует гораздо больше корреляций между атомами, чем мы могли бы ожидать классически. Вид квантовой "суперкорреляции" называется "переплетением" (сцеплением, сплетением, спутанностью, запутанностью – существует множество вариантов перевода английского слова "entanglement").

Сцепленные объекты (запутанные, зацепленные) связаны между собой независимо от того, как далеко они друг относительно друга расположены, расстояние никак не ослабляет сцепленности. Если какой-то объект сцеплен с другими, измерение его состояния одновременно дает сведения о его партнерах. Можно ошибочно предположить, что сцепленность можно использовать для передачи сигналов быстрее скорости света вопреки постулату теории относительности. Однако этому препятствует вероятностная природа квантовой механики.

Аналогично отдельным кубитам, которые можно представить с помощью различных физических объектов, свойства сцепленности не зависят от ее физического представления. Может оказаться, что на практике удобнее работать с той или иной системой, но это не имеет принципиального значения. Например, для квантовой криптографии можно использовать сцепленные пары и фотонов, и атомных ядер, и даже пару "фотон-ядро".

Во второй половине 90-х годов прошлого столетия исследователи показали, что различные формы сцепленности качественно эквивалентны – так, сцепленность одного состояния может быть перенесена на другое, подобно энергии, текущей от зарядного устройства в аккумулятор. Основываясь на качественных соотношениях, ученые пытаются определить ко-

личественную меру сцепленности. Проработка этих вопросов продолжается, и пока нет согласия в выборе способа количественной оценки этой величины.

Результаты экспериментов подтвердили, что квантовые системы в состоянии сцепленности демонстрируют поведение, невозможное в классическом мире.

Со сцепленностью связано такое явление, как квантовая телепортация – одно из наиболее интересных и парадоксальных проявлений квантовой природы материи, вызывающее в последние годы огромный интерес специалистов и широкой публики. Имеется большое число теоретических и экспериментальных работ, исследующих различные аспекты квантовой телепортации.

Термин телепортация взят из научной фантастики, однако в настоящее время широко используется в научной литературе. Квантовая телепортация означает мгновенный перенос квантового состояния из одной точки пространства в другую, удаленную на большое расстояние. Впервые эффект квантовой телепортации был предложен в работе Беннета (С. Bennett) и Brassарда (G. Brassard) с соавторами [31].

Первые идеи квантовой информатики зародились сразу же после 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.

В 1935 г. А. Эйнштейн и его сотрудники Б. Подольский и Н. Розен высказали идею, суть которой на примере элементарных частиц сводится к тому, что квантовый объект, в качестве которых могут быть, например, два связанных фотона, в процессе разделения сохраняют некое подобие информационной связи (эффект "спутывания", "связывания" (entangled)). При этом квантовое состояние одного, например поляризация или спин, может мгновенно время передаваться на другой фотон, который при этом становится аналогом первого, который коллапсирует, исчезает, и наоборот. Расстояние между фотонами может быть любым. Это было названо эффектом, парадоксом или каналом Эйнштейна – Подольского – Розена (ЭПР). Как синоним этого феномена принят также термин "Квантовая Нелокальность" (Quantum NonLocality), подчеркивающий мгновенную распределенность, нелокальность в пространстве связанных по квантовым состояниям элементарных частиц.

По мнению Эйнштейна (Einstein), Подольского (Podolsky) и Розена (Rosen) странное поведение переплетения означало, что квантовая механика было незаконченной теорией, и что в ней должны существовать то, что называют "скрытыми переменными", которые ещё пока не открыты. Это привело к знаменитому спору между Эйнштейном и Нильсом Бором (Niels Bohr), который утверждал, что квантовая механика является законченной теорией и что проблемы Эйнштейна появились из-за того, что он пытался интерпретировать теорию слишком литературно.

Однако в 1964 г. Джон Белл (John Bell) показал [32], что в некоторых экспериментах классическая теория скрытых переменных давала иные предсказания, нежели квантовая механика. Он опубликовал теорему, которая количественно определила, насколько больше взаимодействуют квантовые частицы, нежели это можно было ожидать классически, даже если принять во внимание скрытые переменные. Это сделало возможным протестировать, может ли квантовая механика быть принятой во внимание с помощью скрытых переменных? Было проведено большое количество экспериментов, и результат был почти повсюду принят полностью в пользу квантовой механики. Следовательно, не существует "лёгкого" объяснения переплетённым корреляциям. Единственным видом скрытых переменных, не исключённых тестами Белла, является "нелокальность", что означает, что они могут действовать мгновенно через расстояние.

Недавно, в начале девяностых, поле квантовой информационной теории раскрылось и быстро расширилось. На квантовое переплетение стали смотреть не только, как на головоломку, но и как на ресурс для коммуникации.

Стоит подробнее пояснить, что подразумевается под словами "сцепленное состояние". Речь идет о системе, состоящей из двух взаимодействующих подсистем (например, частиц),

которая в какой-то момент распадается на две не взаимодействующие подсистемы. Для такого зацепленного состояния значение какой-либо физической величины (например, проекция спина электрона на какую-то ось или поляризации фотона) не определено ни для одной из подсистем. Однако, если мы произведем измерение над одной из подсистем и определим значение выбранной физической величины, то мы с достоверностью будем знать значение этой физической величины и для другой подсистемы.

Примером системы, находящейся в зацепленном состоянии, являются два фотона, появившиеся в результате спонтанного параметрического распада фотона, распространяющегося в среде с квадратичной нелинейностью (например, в кристалле  $BaV_2O_4$ ). Для зацепленных фотонов нельзя указать, какова поляризация каждого из фотонов пары; если же произвести измерение над одним фотоном и – тем самым – определить его поляризацию, то и поляризация другого фотона также станет определенной. Стоит подчеркнуть что, производя измерение над одной частицей, мы в тот же момент определяем и состояние другой частицы, как бы далеко эти частицы друг от друга ни находились. Таким образом, связь между частицами носит принципиально нелокальный характер.

С позиций квантовой механики эту связанную систему можно описать некоей волновой функцией. Когда взаимодействие прекращается, и частицы разлетаются очень далеко, их по-прежнему будет описывать та же функция. Но состояние каждой отдельной частицы неизвестно в принципе: это вытекает из соотношения неопределенностей. И только когда одна из них попадает в приемник, регистрирующий ее параметры, у другой появляются (именно появляются, а не становятся известными) соответствующие характеристики. То есть возможна мгновенная "пересылка" квантового состояния частицы на неограниченно большое расстояние. Телепортации самой частицы, передачи массы при этом не происходит. Похожим образом ведет себя разорвавшийся на две части снаряд: если до взрыва он был неподвижен, суммарный импульс его осколков равен нулю. "Поймав" один осколок и измерив его импульс, можно мгновенно назвать величину импульса второго осколка, как бы далеко он ни улетел.

Казалось бы, нарушается принцип причинности – следствие и причина не разделены временем, если понимать время как способ организации последовательности событий.

Действительно, в рамках классического подхода после того, как система распалась на составные части, никакое воздействие на одну из частей не может изменить состояние другой части, если частицы не взаимодействуют. И более того, поскольку скорость распространения сигнала не может превышать скорости света, то при определенных условиях – в рамках классического подхода – воздействие на одну часть системы никаким образом не может повлиять на другую часть системы. В математическом виде это утверждение было сформулировано Дж. Беллом в 1964 г. в виде так называемых неравенств. Джоном Беллом было показано, что пара сцепленных частиц, бывших в контакте, а затем удалившихся друг от друга так, что непосредственное их влияние друг на друга невозможно, эта пара частиц может вести себя с такой вероятностью, которая слишком строго скоррелирована, чтобы быть объясненной классической статистикой.

Рассмотрим эксперимент, проведенный в Рочестерском университете известнейшим специалистом по квантовой оптике Леонардом Манделом с коллегами в начале 90-х годов прошлого столетия. Схема эксперимента Мандела представлена на рис. 21. А по ходу познакомимся с важнейшим для нас понятием запутанных, или квантово-коррелированных состояний. Именно нелокальные свойства запутанных состояний являются ключом к "магии" и ко всем якобы "сверхъестественным" явлениям.

Лазерный луч на рис. 21 с помощью полупрозрачного зеркала расщепляется на два пучка, затем каждый из пучков направляется на так называемый нелинейный кристалл, способный расщеплять квант света (фотон) на два дочерних кванта. Закон сохранения энергии при этом конечно же, выполняется: энергия каждого из дочерних квантов вдвое меньше энергии материнского кванта. Например, если падает луч лазера с длиной волны 405 нм (синего цвета), то на выходе из кристалла будут два луча с длиной волны 810 нм (красного цвета), энергия каж

дого кванта которых вдвое меньше энергии кванта в исходном луче. Затем с помощью системы зеркал делалось так, что каждая из этих двух пар фотонов интерферировала между собой. примерно так, как интерферировали компоненты суперпозиции в нашем опыте с рассеянием электронов на двух щелях. Результаты наблюдения интерференционной картины фиксировались детекторами Д1-Д2 для первой пары фотонов и детекторами Д3-Д4 – для второй пары.

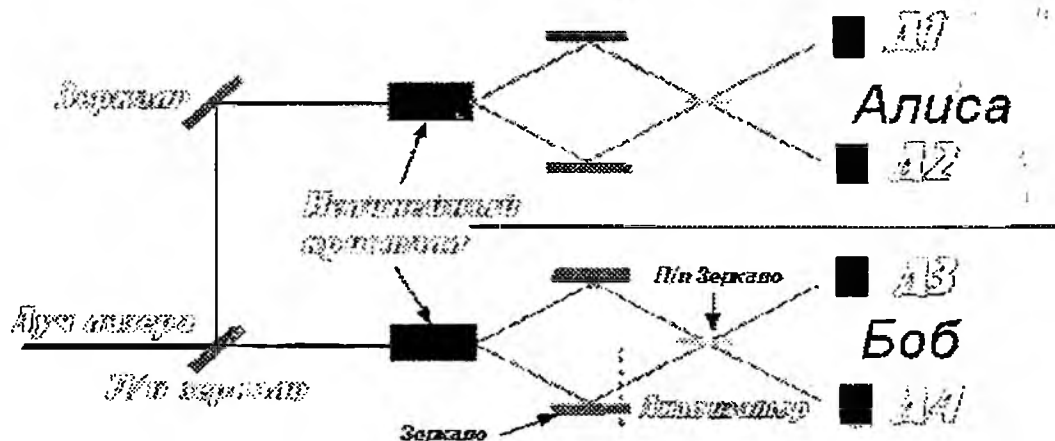


Рис. 21

Как известно, любая частица, обладающая ненулевым спином, в том числе фотон, характеризуется поляризацией, то есть проекцией спина на направление движения. Фотоны могут обладать двумя состояниями поляризации, отвечающими двум возможным проекциям спина – вдоль и против направления движения. Вид поляризации света определяет плоскость колебаний электрического поля электромагнитных волн, и существуют так называемые анализаторы (специальные кристаллы), способные пропускать кванты только с определенной поляризацией. Поскольку различные состояния поляризации находятся в состоянии суперпозиции, то с помощью такого кристалла можно выделять те или иные ее компоненты. Если подобный кристалл поставить по ходу одного из лучей и вращать его относительно оси луча, то интерференционная картина будет меняться из-за изменения соотношения между компонентами суперпозиции. Подобные действия в данном эксперименте приведут к изменению вероятностей регистрации фотонов (одного или двух) каждым из детекторов.

Итак, Мандел пространственно разнес два пучка на достаточно большое расстояние и начал менять с помощью анализатора соотношение между компонентами суперпозиции на одном из них (нижний на рис. 21). В силу его манипуляций интерференционная картина на этом пучке менялась. Второй пучок он вообще не трогал. Но интерференционная картина, наблюдаемая на этом втором пучке, точно повторяла интерференционную картину на пучке, с которым экспериментировал Мандел. И картина эта менялась мгновенно, в то же самое время, когда менялась картина на первом пучке. И это притом, что никаких объективных причин для изменения картины на первом пучке просто не было. Ведь человек в этом случае никак не взаимодействовал с объектом наблюдения, и никакого материального носителя взаимодействия между пучками не было. Выходит, квантовый объект каким-то образом узнавал, что происходит с другим объектом, удаленным от него на значительное расстояние (сейчас проведены эксперименты с расстоянием между парами фотонов более 100 км).

Подобную связь между частицами называют квантовыми корреляциями, а состояния участвующих в них частиц – запутанными.

Запутанные состояния (это устоявшийся термин) в общем случае могут возникать в системе, которая в какой-то момент распадается на невзаимодействующие подсистемы. Например, если электрон сталкивается с атомом, то образуется запутанное состояние, в котором состояние электрона будет коррелировано с состоянием атома в результате произошедшего взаимодействия. Отметим, что запутанное состояние не может быть представлено в виде совокупности состояний отдельных частей системы в силу наличия корреляций между ними.

Также, запутанность – это физическая величина, которая имеет количественные характеристики, и она может быть определена непосредственно в эксперименте.

Суперпозиционные состояния – более общее понятие, чем запутанные состояния. В них компоненты волновой функции могут быть как коррелированы между собой, так и нет. Последний случай отвечает наличию в системе изолированных подсистем, которые никогда не взаимодействовали друг с другом. В эксперименте Мандела запутанные состояния пар фотонов возникали в ходе расщепления исходного кванта на нелинейном кристалле, а лазер был необходим для создания совершенно идентичных по своим характеристикам фотонов.

Наличие квантовых корреляций – неотъемлемое свойство запутанных состояний. Для сцепленных фотонов нельзя указать, какова поляризация каждого из фотонов пары. Если же произвести измерение над одним фотоном и тем самым определить его поляризацию, то поляризация другого фотона также станет определенной. И вести себя эта частица будет теперь иначе, чем до измерения, проведенного с первой частицей. Запутанные состояния частиц означают наличие связи между характеристиками этих частиц после их взаимодействия, и эта связь куда более жесткая, чем следует из классических представлений. Если частицы когда-то провзаимодействовали, то в замкнутых системах связь между ними будет сохраняться всегда, и она будет мгновенной, на каком бы расстоянии друг от друга они не находились. То есть пара или какая-либо совокупность частиц будет вести себя как единый объект. Это утверждение справедливо всегда для замкнутых (изолированных) систем, а в случае открытых систем связь между частицами будет сохраняться до тех пор, пока суперпозиция состояний не превратится под влиянием взаимодействия с окружающими телами в смесь.

Ситуация с мгновенной связью между частицами похожа на то, как если бы сталкивались два шара, чёрный и белый, при этом область их столкновения не наблюдаема, и мы не знаем, какой куда полетит. Мы просто наблюдаем вылетевшие из невидимой области шары, а какой из них каким был, мы не знаем. Для квантовых частиц не будет так, как подсказывает здравый смысл: каждый шар изначально белый или чёрный, мы только можем не знать его цвет. Вылетевшие шары будут вести себя как "серые", то есть в каждом из них будет присутствовать суперпозиция белого и чёрного, и это проявляется в эксперименте. Но так будет происходить только до тех пор, пока мы не определим цвет одного из шаров. Если мы определили его цвет как чёрный, то другой немедленно перестаёт вести себя как серый, и начинает проявлять себя в эксперименте как белый, на каком бы расстоянии он не находился.

Теперь представим, что возле одного из пучков находится Алиса, которая проводит эксперименты, а возле другого – Боб, который не знает о существовании Алисы. Для Боба изменение результатов эксперимента на его пучке выглядит как чудо, чудо в самом мракобесном понимании. Ведь Боб ничего не делает со своим пучком, все условия эксперимента остаются постоянными, а интерференционная картина по совершенно непонятным причинам меняется. То он видит "белые" шары, то "серые", то "чёрные". А никаких причин для изменения картины Боб не найдёт, как бы он ни старался. Эта причина находится в другом событийном пространстве, можно сказать, что она "магически" (то есть через квантовые корреляции) связана с его событийным пространством. Для Боба же всё выглядит так, как будто есть следствие, но нет причины, ведь классически эти два пространства событий никак не связаны.

Похожую схему можно использовать и для "мгновенной" передачи информации между Алисой и Бобом. Посредством присоединения третьей – "информационной" – частицы к одной из сцепленных частиц у Алисы можно передать ее свойства другой подобной частице, находящейся на установке Боба. То есть мы можем не только мгновенно передать информацию о состоянии какой-либо частицы, но и воспроизвести это состояние.

Явление мгновенной передачи свойств частицы на расстояние получило название квантовой телепортации.

Способ практической реализации этого эффекта был предложен в 1993 году группой Чарльза Беннета (IBM), которая, используя парадокс ЭПР, показала, что, в принципе сцепленные частицы могут служить своего рода «транспортном». Посредством присоединения

третьей – «информационной» – частицы к одной из сцепленных частиц можно передавать ее свойства другой, причем даже без измерения этих свойств

В эксперименте неполяризованный свет, проходящий через кристалл, расщепляется на два поляризованных во взаимно перпендикулярном направлении луча. В оптическом смесителе фотон взаимодействовал с одним из пары связанных фотонов. Между ними в свою очередь возникала квантово-механическая связь, приводящая к поляризации новой пары. Согласно законам квантовой механики фотон не имеет точного значения поляризации, пока она не измерена детектором. Таким образом, измерение преобразует набор всех возможных поляризаций фотона в случайное, но совершенно конкретное значение. Измерение поляризации одного фотона связанной пары приводит к тому, что у второго фотона, как бы далеко он ни находился, мгновенно появляется соответствующая – перпендикулярная ей – поляризация.

Если к одному из двух исходных фотонов "подмешать" посторонний фотон, образуется новая пара, новая связанная квантовая система. Измерив ее параметры, можно мгновенно передать сколь угодно далеко – телепортировать – направление поляризации уже не исходного, а постороннего фотона. В принципе практически все, что происходит с одним фотоном пары, должно мгновенно влиять на другой, меняя его свойства вполне определенным образом. Однако на практике такая связь достаточно чувствительна к внешним воздействиям, поэтому необходимо изолировать частицы от внешних влияний.

Экспериментальная реализация ЭПР – канала в 2001 – 2002 гг. была осуществлена группой ученых из Венского университета [33]. С высоким уровнем достоверности экспериментально продемонстрировано, что неравенство Белла нарушается и квантовая телепортация действительно имеет нелокальную природу. Опыты группы доказали выполнимость принципов ЭПР на практике для передачи через световоды состояний поляризации между двумя фотонами посредством третьего на расстояниях до 10 км.

В этих экспериментах квантовая телепортация осуществлялась несколько более сложным способом, чем описывалось выше; телепортируемое состояние само по себе являлось запутанным. Генерировались две пары запутанных фотонов (на рис. 22 слева приведена "логическая" схема эксперимента, справа – ее приборная реализация). из каждой пары по одному фотону (0 и 3) направлялось Бобу, и по одному (1 и 2) – Алисе. Алиса производила измерение над фотонами 1 и 2, в результате чего пара фотонов оказывалась в одном из четырех возможных запутанных состояний (при этом фотоны 0 и 3 также оказывались в определенном запутанном состоянии); результаты измерения сообщались Виктору. Особенность ситуации в том, что фотоны 0 и 3 первоначально не находились в запутанном состоянии, их запутанность порождалась действиями Алисы над фотонами 1 и 2. Боб проводил поляризационные измерения над каждым из фотонов 0 и 3 (и также сообщал результаты Виктору). Виктор сравнивал результаты измерений и мог фиксировать нарушение неравенства Белла, что и было сделано.

Пары запутанных фотонов генерировались при прохождении импульса ультрафиолетового лазера через кристалл  $BaB_2O_4$ . После спектральной фильтрации фотоны поступали в одномодовое оптоволокно и направлялись Бобу и Алисе.

Австрийские ученые также провели эксперимент в модифицированном виде. Регистрация фотонов Бобом происходила до того, как Алиса производила свое измерение. Оказалось (как и следует ожидать в рамках квантовой механики), что это никак не повлияло на результаты эксперимента. В рамках классического подхода возникает неразрешимый парадокс – позднее по времени действие Алисы влияет на результат более раннего действия Боба. Однако с квантово-механической точки зрения парадокса нет: наблюдаемый эффект надо понимать так, что физическая интерпретация результатов Боба зависит от позднейшего решения Алисы.

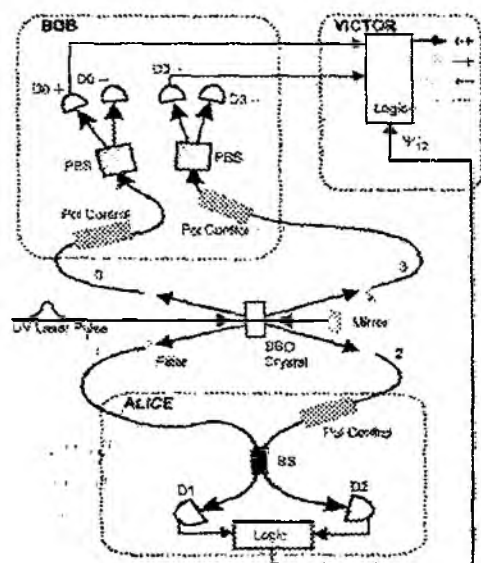
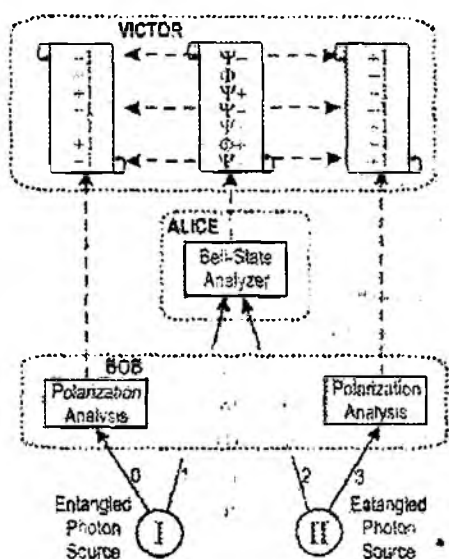


Рис 22

## Заключение

Достигнув успехов в телепортации фотонов, экспериментаторы уже планируют работы с другими частицами – электронами, атомами и даже ионами. Это позволит передавать квантовое состояние от короткоживущей частицы к более стабильной. Таким способом можно будет создавать запоминающие устройства, где информация, принесенная фотонами, хранилась бы на ионах, изолированных от окружающей среды.

В различных странах обсуждаются программы по применению эффекта квантовой телепортации для создания квантовых оптических компьютеров, где носителями информации будут фотоны.

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. Квантовые компьютеры будут реализовывать холодные вычисления, работая 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.

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. То есть невозможно, получив полную информацию о квантовом объекте А (изначально его состояние неизвестно), создать второй, точно такой же, объект, не разрушив первый. Дело в том, что создание двух кубитов абсолютных копий друг друга приводит к противоречию, которое можно было бы назвать парадоксом квантовых близнецов. Однако 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.

Ученые, занимающиеся квантовой информатикой, пытаются постичь соотношения между классическими и квантовыми единицами информации, ищут новые способы обработки кванто

вой информации и исследуют чрезвычайно важное квантовое свойство – сцепленность состояний (entanglement), которой обуславливаются сложные связи между различными объектами.

Квантовая информатика [34] стала новым междисциплинарным научным направлением на стыке физики, информатики и математики, которое поднимает новые важные вопросы и дает ключ к пониманию некоторых фундаментальных закономерностей Природы, до недавних пор остававшихся вне поля зрения исследователей. Ее теоретические разработки стимулируют как новые достижения в области математики, так и развитие экспериментальной физики.

**Список литературы:** 1. *Савельев И. В.* Курс общей физики. М.: Наука, 1987. 2. *Белокуров В. В., Тимофеевская О. Д., Хрусталева О. А.* Квантовая телепортация – обыкновенное чудо // РХД. Ижевск. 2000. 255 с. 3. *Трейман С.* Этот странный квантовый мир / Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика 2002. 4. *Виноградов Ю. В.* Основы электронной и полупроводниковой техники. Изд. 2-е, доп. М.: Энергия, 1972. 536 с. 5. *William F. Brinkman, Douglas E. Haggan, William W. Trowman.* A History of the Invention of the Transistor and Where it will lead us / IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol.32, No.12. December 1997. 6. *Валиев К. А., Кокин А. А.* От квантов к квантовым компьютерам // Природа. 2002. №12. С.28-34. 7. *Алферов Ж. И.* История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. 1998. Т. 32, вып. 1. С. 3-18. 8. *Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Щукин В. А., Котьев П. С., Алферов Ж. И., Бимберг Д.* Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // ФТП. 1998. Т. 32, вып. 4. С. 385-410. 9. *Алферов Ж. И.* ФТП. Т. 32, 3 (1998). 10. *Алферов Ж. И.* ФТП. т.1, 436 (1967). 11. *Алферов Ж. И., Андреев В. М., Гарбузов Д. З., Жияев Ю. В., Морозов Е. П., Портной Е. Л., Трофим В. Г.* ФТП. т.4. 1826 (1970). 12. *Суэману Я., Катаока С., Кусино К., Кокубун Я., Судзуки Т., Исии О., Энэдзава С.* Основы оптоэлектроники. М.: Мир. 1988. 13. *L. Esaki, R. Tsu.* IBM J. Res. Dev., v.14, 61 (1970). 14. *Саймон Бенджамин (Simon Benjamin), Артур Экерт (Artur Ekert).* Уменьшая компьютер // <http://www.qubit.org/>. 15. *Benjamin S. C., Ardavan, A., Andrew, G., Briggs, D., Britz, D. A., Gunlycke, D., Jefferson, J., Jones, M. A. G., Leigh, D. F., Lovett, B. W., Khlobystov, A. N., Lyon, S. A., Morton, J. J. L., Porfyrakis, K., Sambrook, M. R. and Tyryshkin, A. M.* 'Towards a fullerene-based quantum computer' Journal of Physics-Condensed Matter 18(21) (2006). S867-S883. 16. *Landauer R.* Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process // IBM Journ. Res. Develop., 1961, v.5, N.3. p. 183-191. (*Ландауер Р.* Необратимость и выделение тепла в процессе вычислений. Пер. с англ. под ред. В. А. Сапожничего // Квантовый компьютер & квантовые вычисления. Т. 1. N 2. Ижевск РХД. 1999. С.9-32.) 17. *Bennett C. H.* The Thermodynamics of Computation – A Review // Inter. Journ. of Theor. Phys., 1982, v. 21, N.12. p.905-940. 18. *Бароне А., Патерно Дж.* Эффект Джозефсона. М.: Мир 1984. 19. *Брандт Н. Б.* Сверхпроводимость // Соросовский образовательный журнал. 1996. №1. С.100-107. 20. *Кухаркин Е. С.* Инженерная электрофизика. М.: Высш. шк. 1982. 21. *Гольцман Г. Н.* Эффекты Джозефсона в сверхпроводниках // Соросовский образовательный журнал. 2002. Т. 6, №4. С.96-102. 22. *Черноплеков Н. А.* Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения // Вестник Российской Академии наук. 2001. Т.71, №4. С. 303-319. 23. *Манин Ю. И.* Вычислимое и невычислимое. М.: Сов. радио. 1980. С. 128. 24. *Фейнман Р.* Моделирование физики на компьютерах // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Вып. 2. Ижевск. 1999. С. 53-95. 25. *Стит Э.* Квантовые вычисления // РХД. М.: Ижевск, 2000. 26. *Бауместер Д., Экерт А., Цейлингер А.* Физика квантовой информации / Постмаркет. М., 2002. 375 с. 27. *Валиев К. А., Кокин А. А.* Квантовые компьютеры: надежды и реальность // Регулярная и хаотическая динамика. М.; Ижевск, 2001. 350 с. 28. *Кокин А. А.* Твердотельные ядерные магнито-резонансные (ЯМР) ансамблевые квантовые компьютеры // Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2003. 29. *Шор П.* Полиномиальные по времени алгоритмы разложения числа на простые множители и нахождение дискретного алгоритма для квантового компьютера // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Вып.2. Ижевск, 1999. С. 200-247. 30. *Гровер Л. К.* Квантовая механика помогает найти иголку в стоге сена // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Вып.2. Ижевск, 1999. С.101-109. 31. *Bennet C. H., Brassard G., Crepeau C.* Teleporting and unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels // Phys. Rev. Lett. v.70.1993. 32. *Bell J. S.* On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox // Physics. 1964. V.1. 33. *Thomas Jennewein, Gregor Weihs, Jian-Wei Pan, and Anton Zeilinger.* // Phys.Rev.Lett. 2002. V.88. 34. *Халево А.* Квантовая информатика: прошлое, настоящее, будущее // В мире науки. 2008. № 7.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.10.2007