

*ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА*

М. П. МАЛЫХИНА, Д. А. ГЕРАСИМОВ

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: fflogf@yandex.ru*

С середины прошлого века производители микросхем в погоне за миниатюризацией шаг за шагом спускались к атомным масштабам и на сегодняшний день достигли размеров транзисторов в 22 нанометра. При размерах меньше 10 нанометров наступает теоретический предел, при котором квантовые эффекты делают дальнейшее уменьшение транзистора невозможным. Электроны начинают просачиваться сквозь слой толщиной в несколько атомов. Тема квантового компьютера стала достаточно популярной и актуальной в последнее время для дискуссий в сфере информационных технологий, а также в кругах физиков. В данной статье описывается история возникновения идеи квантовых вычислений в целом и возникновения идей физической реализации квантового компьютера в частности, а также основополагающие теории, описывающие принципы его работы.

Ключевые слова: квантовый компьютер, кубит, суперпозиция, когерентность, квантовомеханические эффекты, квантовая запутанность, спин.

Начало теории квантового компьютера положили открытия, за которые их авторы удостоились Нобелевской премии. В 1918 году Макс Планк открыл элементарную частицу - квант, а Альберт Эйнштейн в 1921 году фотон - элементарную частицу света. В 1935 году Эйнштейн вместе с Борисом Подольским и Натаном Розеном написали статью "Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным?", которая впоследствии была названа парадоксом Эйнштейна - Подольского - Розена (ЭПР) [1]. После появления статьи ЭПР в 1935 году физик Эрвин Шредингер написал свою статью, которая должна была быть продолжением и уточнением выводов, сделанных Эйнштейном, Подольским и Розеном. В переводе название статьи звучит как "Нынешняя ситуация в квантовой механике". В этой статье Шредингер ввел два понятия: понятие квантовой запутанности и "парадокс кота" Шредингера. "Парадокс кота" Шредингера заключается в том что "кот" находится в двух состояниях одновременно, он жив и мёртв, это состояние называется суперпозицией [2].

Квантовый компьютер - это вычислительное устройство, которое использует явления квантовой суперпозиции и квантовой запутанности для передачи и обработки данных.

Квантовая запутанность - квантово - механическое явление, при котором квантовые состояния двух или большего числа объектов оказываются взаимозависимыми. Такая взаимозависимость сохраняется, даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий, что находится в логическом противоречии с принципом локальности. Например, можно получить пару фотонов, находящихся в запутанном состоянии, и тогда, если при измерении спина первой частицы её спиральность оказывается положительной, то спиральность второй всегда оказывается отрицательной, и наоборот [3].

В квантовом компьютере применяется кубит от английского quantum bit (qubit). Квантовая система с двумя различными состояниями $|0\rangle$, $|1\rangle$, способна нести 1 бит информации. Это наименьший элемент для хранения информации. В качестве кубита могут выступать фотоны, атомы, ионы, ядра атомов.

Спин - собственный момент импульса элементарных частиц, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы как целого. Спином называют собственный момент импульса атома ядра, иона или фотона, который определяется как векторная сумма спинов элементарных частиц, образующих систему орбитальных соединений, которые движутся внутри системы. Спин измеряется в единицах \hbar и равен $\hbar J$, где J - характерное целого для каждой частицы, в том числе нулевое или полуцелое положительное число, так называемое спиновое квантовое число. Все элементарные частицы делятся на два класса: бозоны - частицы с целым спином (фотон, глюон, мезоны, бозон Хиггса) и фермионы - частицы с полуцелым спином (электрон, протон, нейтрон, нейтрино) [4].

Главным условием здесь является наличие двух квантовых состояний. Изменение состояния определенного бита в обычном компьютере не ведет к

изменению других, а вот в квантовом компьютере изменение одной частицы введет к изменению состояния других частиц. Необходимо, чтобы они сохраняли состояние квантовой когерентности. Одна случайная молекула воздуха или другой малейший шум в системе способны выбивать кубиты из когерентной сцепленности. Поэтому все необходимо тщательно экранировать буквально от всего.

Бит классического компьютера может иметь одно из значений 0 или 1, а квантовый компьютер имеет базисные значения 0 и 1, и находится во всех этих состояниях одновременно, также имеет и свою комплексную амплитуду, и находится в состоянии квантовой суперпозиции.

В формуле возможного состояния $|j\rangle$, комплексная амплитуда λ_j , и $|\Psi\rangle$ квантовое состояние.

$$|\Psi\rangle = \sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j |j\rangle.$$

В квантовой суперпозиции 0 и 1 имеет состояние $A * |0\rangle + B * |1\rangle$, где A и B - комплексные числа, из которых получаем $|A|^2 + |B|^2 = 1$.

Однако, компания IBM настаивает на том, что правильно записывать $0 + 1$, так как данные значения в квантовом компьютере имеют фазовое взаимодействие друг с другом, что приводит к выходу в суперпозицию. Именно это свойство позволяет квантовому компьютеру выбрать правильное решение среди миллионов вероятных комбинаций гораздо быстрее обычного компьютера. И его потенциал может раскрыться в полной мере в высокоскоростной обработке больших объемов информации. Для примера в таблице 1 приведены значения в левом столбце количество кубит, а в правом значение бит классической информации.

Таблица 1 - Количество бит в кубитах

Кубит	Бит
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16
6	32
7	64
8	128
9	256
10	512

Если продолжить таблицу 1, то можно увидеть что 31 кубит будет равняться 1 073 741 824 байт или же 1 гигабиту.

О большом потенциале вычислений говорил Фейнман в знаменитой лекции “Внизу полным-полно места”, которую он прочитал в 1959 году на встрече Американского физического общества, состоявшейся в Калифорнийском Институте технологии в Пасадене. В своей лекции Фейнман предположил новые технологии, которые будут развиваться от способности человека манипулировать материей [5].

В 1960-ых годах американский физик Р. Ландауэр, работавший в корпорации IBM, пытался обратить внимание научного мира на то, что вычисления - это всегда некоторый физический процесс, а значит, невозможно понять пределы наших вычислительных возможностей, не уточнив, какой физической реализации они соответствуют. А в 1980 году Юрий Манин описал теорию о квантовом компьютере, в 1981 году Ричард Фейнман предложил первую модель квантового компьютера. В этом же году Пол Бениофф описал теоретические основы построения квантового компьютера, им было предложено использовать не обычные алгоритмы, а квантовые алгоритмы, использующие квантовомеханические эффекты. Стивен Визнер в 1983 году опубликовал общую концепция квантового компьютера, которую пытался

опубликовать на протяжении 10 лет. В 1985 году Дэвид Дойч предложил конкретную математическую модель квантового компьютера. Все вышеперечисленные события определили направление развития квантового компьютера и привели к возникновению споров на тему квантовых алгоритмов и квантовых операций: по причине невозможности физической реализации квантового компьютера, и в виду недостаточной развитости направления транзисторных компьютеров. Поэтому, физическое построение квантового компьютера было отнесено к разряду научной фантастики.

Ситуация меняется в 1994 г. Американский математик Питер Шор предложил для квантового компьютера алгоритм факторизации, а в 1996 году его напарник по работе Л. Гровер предложил квантовый алгоритм быстрого поиска в неупорядоченной базе данных.

Уже в начале 2000-х годов во многих научных лабораториях были созданы однокубитные квантовые процессоры, управляемые двухуровневыми системами, в которых можно было предполагать возможность масштабирования на много кубитов. Также к данному временному отрезку относится появление огромного количества публикаций, связанных с квантовым компьютером и квантовыми алгоритмами. В 2001 году компания IBM создала 7-кубитный квантовый компьютер, на котором был смоделирован алгоритм Питера Шора и были найдены сомножители числа 15 (числа 3 и 5). К 2002 году количество публикаций в этом направлении возрастает, но этот процесс сопровождается тем, что авторы, ранее занимавшиеся данной тематикой, перестают ею заниматься из-за отсутствия ресурсов и сложности построения квантовых элементов. В 2005 году группой Ю. Пашкина при помощи японских специалистов был построен двухкубитный квантовый процессор на сверхпроводящих элементах. В 2007 году компания D-Wave создает 16-кубитный квантовый процессор, по словам компании, являющийся первым, который может запускать коммерчески - значимые приложения. В 2008 году компания D-Wave выпускает 28 - кубитный квантовый компьютер D-Wave Orion, который уже может распознавать изображения известных

достопримечательностей. В ноябре 2009 года физикам из Национального института стандартов и технологий в США впервые удалось собрать программируемый квантовый компьютер, состоящий из двух кубит, а на начало 2010-х годов приходится построение ограниченных его вариантов, самые большие сконструированные квантовые регистры имеют немногим более десятка связанных кубит. В 2011 году компанией D-Wave публикуется научная статья, основанная на теории квантовой запутанности и ее применении в построении квантового компьютера D-Wave Orion. В феврале 2012 года компания IBM сообщила о достижении значительного прогресса в физической реализации квантовых вычислений с использованием сверхпроводящих кубитов, которые, по мнению компании, позволят начать работы по созданию квантового компьютера. В апреле 2012 года группе исследователей из Южно-Калифорнийского университета, Делфтского Технологического университета, университета штата Айова и Калифорнийского университета в Санта-Барбаре удалось построить двухкубитный квантовый компьютер на кристалле алмаза с примесями. В начале 2013 года компанией D-Wave создается квантовый компьютер D-Wave X, имеющий 512 кубит, который сначала был продан компании Lockheed Martin, затем компании NASA. В марте этого же года было продано несколько квантовых компьютеров D-Wave X компании Google, с целью улучшения персонализированного поиска, точности предсказания пробок на основе данных GPS, распознавания речи, машинного перевода с других языков, работы с облачными хранилищами данных. В этом же году выходит научная публикация, предметом которой выступает схема коррекций ошибок при взаимодействии кубитов, разработанная командой в Санта-Барбаре и компанией IBM. В 2014 году компания Google создает свою лабораторию, к работе в которой привлекает специалистов из Санта - Барбары и ставит перед ними цель, заключающуюся в нахождении подхода к построению квантового компьютера. Компания Google выпускает язык программирования Quipper и техническую документацию к нему. В 2015 компания D-Wave выпускает квантовый компьютер D-Wave X2, который в дальнейшем покупает компания

Google. Затем компания Google выпускает научную публикацию о работе на квантовом компьютере D-Wave X2. В декабре 2015 компания IBM выпускает научную публикацию о двойной коррекции ошибок и показывает новое построение квантового процессора, а также компания Майкрософт выпускает 27-кубитный симулятор квантового компьютера с использованием языка программирования F# и возможностью запуска симулятора в операционной системе Windows.

В заключение можно сделать выводы, что данное направление медленно, но развивается и по прогнозу исследователей из компании Cisco Systems, полноценный квантовый компьютер должен появиться к середине 2020 года. Квантовый компьютер стоимостью в \$1000 может быть таким же мощным, как человеческий мозг. В IBM говорят, что ее специалисты смогут создать квантовый компьютер через 10 - 15 лет. Внешне такие системы будут напоминать традиционные серверные станции. Но для их полноценной работы, скорее всего, придется охлаждать их модули на сотни градусов по Цельсию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н. Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным? Физ. Откр. - Американское Физическое Общество, 1935. - Вып. 47, - 780 стр.
2. Даулинг Ж. Р., Приложение убийцы Шредингера и гонка построения первого в мире квантового компьютера. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton. Taylor & Francis Group, LLC. 2013г. - 445 стр.
3. Холево А. С., Квантовая информатика: прошлое, настоящее, будущее // В мире науки : журнал. - 2008. - № 7.
4. Прохоров А. М., Д. М., Балдин А. М., том 4: Физическая энциклопедия. Пойнтинга - Робертсона эффект - Стримеры. Большая рос. энцикл., 1994. - 704с.
5. Фейнман Р. Ф., Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики. Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева, 2002, т. XLVI, №5.

REFERENCES

1. Eynshteyn A., Podolskiy B., Rozen N. *Mozhno li schitat kvantovomekhanicheskoe opisaniye fizicheskoy realnosti polnym?* Fiz. Otkr. - Amerikanskoe Fizicheskoe Obshchestvo, 1935. - Vyp. 47, - 780 str.
2. Dauling Zh. R., *Prilozheniye ubiytsy Shredingera i gonka postroeniya pervogo v mire kvantovogo kompyutera.* 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton. Taylor & Francis Group, LLC. 2013g. - 445 str.
3. Kholevo A. S., *Kvantovaya informatika: proshloe, nastoyashchee, budushchee // V mire nauki : zhurnal.* - 2008. - № 7.
4. Prokhorov A. M., D. M., Baldin A. M., tom 4: *Fizicheskaya entsiklopediya. Poyntinga - Robertsona effekt - Strimery.* Bolshaya ros. entsikl., 1994. - 704s.
5. Feynman R. F., *Vnizu polnym-polno mesta: priglaseniye v novyy mir fiziki.* Zh. Ros. khim. ob-va im. D. I. Mendeleeva, 2002, t. XLVI, №5.

*THE HISTORY OF DEVELOPMENT AND MODERN STATE
OF THE QUANTUM COMPUTER*

M. P. MALYKHINA, D. A. GERASIMOV

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072;
e-mail: fflogf@yandex.ru*

Since the middle of last century, chip manufacturers in the pursuit of miniaturization, step by step, down to the atomic scale and has now reached the size of transistors 22 nanometres. At sizes less than 10 nanometers there comes a theoretical limit at which quantum effects make further reduction of the transistor impossible. The electrons will begin to seep through the layer of thickness of several atoms. Therefore, the topic of quantum computer has become quite popular and important in recent times for discussions in the field of information technology, as well as in the circles of physicists. This article describes the history of the idea of quantum computing in General and the emergence of ideas of the physical realization of a quantum computer in particular, as well as the fundamental theory describing how it works.

Key words : quantum computer, qubit, superposition, coherence, quantum effects, quantum entanglement, spin.