

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕХНИКИ

И.И. Рябцев, зав. лаб. Института физики полупроводников СО РАН, д-р физ.-мат. наук

С.П. Юркевичус, вед. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц.,
jursp@extech.ru

Изложены научно-технические проблемы и перспективы создания квантовых компьютеров. Проведен краткий анализ состояния научных исследований в этой области за рубежом.

Ключевые слова: квантовый компьютер, кубит, квантовые операции, технологии квантовой обработки информации.

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF CREATION OF QUANTUM COMPUTERS TO PROMISING MODELS OF EQUIPMENT

I.I. Ryabtsev, Head of Laboratory, Institute of Semiconductor Physics SB RAS,
Ph.D. of Physics and Mathematics

S.P. Jurkiewichus, Leading Researcher, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Associate
Professor, *jursp@extech.ru*

The article presents scientific and technological problems and prospects of creation of quantum computers and gives the short analysis of the state of research in this area abroad.

Keywords: quantum computer, qubit, quantum operations, technology quantum information processing.

Введение

Интерес к квантовым компьютерам обусловлен как видимыми в недалеком будущем пределами возможностей современных компьютеров, так и совершенно иными принципами работы, основанными на быстрой параллельной обработке информации [1]. В общем случае, под квантовым компьютером понимается вычислительная система, в основе работы которой лежат законы квантовой механики [2]. Благодаря дискретности состояний, квантовые объекты (молекулы, атомы, электроны и т.д.) могут представлять отдельные биты информации или логические элементы. Например, если квантовый объект способен находиться в двух стационарных состояниях, то их можно принять за логические $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Такой объект называется кубитом (quantum+bit=qubit), или квантовым битом информации. В отличие от обычного бита, кубит может находиться в суперпозиции квантовых состояний $a|0\rangle+b|1\rangle$. Квантовая система из N кубитов (например, ансамбль двухуровневых атомов) представляет собой квантовый регистр. Число базисных состояний регистра равно 2^N , что является основой для выполнения быстрых алгоритмов параллельных вычислений, поскольку изменение состояния одного или нескольких кубитов будет изменять сразу все состояния квантового регистра. При вычислениях на классическом компьютере элементарная квантовая логическая операция над такой суперпозицией потребовала бы 2^N шагов. Возникающий таким образом квантовый параллелизм является главным практическим преимуществом квантового компьютера.

Анализ состояния научных исследований и степени их реализации

До настоящего времени наилучший путь практической реализации квантового компьютера остается неизвестным. Разработка реального квантового компьютера требует последовательного решения ряда сложных научных и технических задач. На первом этапе необходимо выбрать наиболее подходящие квантовые объекты в качестве кубитов. Они должны удовлетворять ряду критериев, сформулированным в работах ДиВинченцо [3]: 1) возможность инициализации кубитов (задание начальных состояний); 2) возможность индивидуальной адресации и управления состоянием отдельных кубитов; 3) достаточно большие времена сохранения когерентности квантовых состояний; 4) возможность масштабирования к большому числу кубитов (для полноценного квантового компьютера необходимо 500–1000 кубитов); 5) возможность выполнения набора универсальных одно- и двухкубитовых квантовых операций.

Поскольку эти требования весьма противоречивы, следует параллельно выполнять исследования с различными вариантами физической реализации кубитов: одиночными ионами, нейтральными атомами, квантовыми точками и примесными атомами в полупроводниках, точечными дефектами в алмазе, сверхпроводниковыми джозефсоновскими контактами и т.д. Как правило, каждый из этих кубитов хорошо удовлетворяет одним критериям и не удовлетворяет другим. Например одиночные ионы в радиочастотных ловушках позволяют выполнять одно- и многокубитовые операции с высокой точностью, однако не позволяют создать квантовый регистр с достаточно большим числом кубитов (более 20–30). Квантовые точки и точечные дефекты хорошо масштабируются, но имеют короткие времена когерентности (менее 10 нс). Сверхпроводниковые кубиты требуют охлаждения до сверхнизких температур (менее 50 мК) и также имеют проблему масштабирования.

Ранее в многочисленных теоретических и экспериментальных работах рассматривались различные варианты кубитов. Предлагалось использовать сложные молекулы [4], одиночные ионы в электростатических ловушках [5], квантовые точки в полупроводниках [6], джозефсоновские контакты в сверхпроводниках [7] и др. Простейшие квантовые вычисления были впервые продемонстрированы на органических молекулах с использованием техники ядерного магнитного резонанса в жидкостях [8]. Однако они, по-видимому, не имеют перспектив практического использования из-за трудности масштабирования к большому числу кубитов и малой скорости выполнения квантовых операций. Подобные проблемы возникают и в экспериментах с одиночными ионами в электростатических ловушках, в которых на сегодняшний день достигнуты наибольшие успехи в реализации простых квантовых алгоритмов [9]. В то же время, кубиты в полупроводниках и сверхпроводниках находятся в начальной стадии разработки и испытывают проблемы быстрой декогерентизации, а также отсутствия эффективного контроля и управления их квантовыми состояниями.

Сравнительно недавно появились предложения об использовании в качестве кубитов холодных нейтральных атомов [10], которые могут образовывать большие упорядоченные ансамбли в оптических решетках. Это стало возможным благодаря значительным успехам в области лазерного охлаждения и захвата атомов, достигнутым в последние годы [11], в том числе и получению Бозе-конденсата из газа холодных атомов. Нейтральные атомы слабо взаимодействуют с окружением, а квантовые операции с ними могут выполняться одновременно во всем ансамбле. Холодные атомы в оптических решетках удовлетворяют практически всем критериям ДиВинченцо: они дают возможность инициализации, управления состоянием и положением одиночных кубитов с помощью индивидуальных лазерных импульсов, обладают большими временами сохранения когерентности и возможностью масштабирования к большому числу кубитов в оптических решетках [12].

В случае атомов щелочных металлов двухуровневые кубиты представлены двумя сверхтонкими подуровнями основного S-состояния валентного электрона. Однокубитовая операция NOT реализуется посредством рамановских переходов между этими подуровнями под

действием двухчастотных лазерных импульсов, которые инвертируют состояние кубита [13]. Также может применяться индивидуальная адресация резонансным СВЧ-полем при подстройке частоты сверхтонкого расщепления с помощью светового сдвига уровней в жестко сфокусированном лазерном поле [14]. Двухкубитовые операции выполняются путем их кратковременного лазерного возбуждения в высоколежащие (ридберговские) состояния, которые обладают большими дипольными моментами и обеспечивают сильное диполь-дипольное взаимодействие. В 2010 г. группой из США были впервые экспериментально реализованы двухкубитовые квантовые операции на основе эффекта дипольной блокады при лазерном возбуждении ридберговских состояний [15]. Выполнение логической операции CNOT было продемонстрировано для двух атомов Rb, захваченных в две оптические дипольные ловушки, разнесенные на расстояние 10 мкм. Длительность последовательности лазерных импульсов, необходимых для выполнения логической операции, составила 7 мкс, но полный экспериментальный цикл длился около секунды. В настоящее время этой группой выполняются исследования по увеличению числа дипольных ловушек и повышению точности выполнения квантовых операций. Несколько других научных групп из США и Европы также работают в этом направлении.

Другим перспективным вариантом признаны твердотельные кубиты на основе центров азотных вакансий (NV-центров) в кристаллах алмаза [16]. Их преимуществом является то, что они допускают масштабирование до произвольного числа кубитов, упорядоченных в заданные пространственные структуры. Оптически активные примесные центры в твердых телах обладают существенно более высокой однородностью свойств по сравнению с искусственными квантовыми точками. В частности, отрицательно заряженные NV-центры в алмазе рассматриваются сегодня как наиболее перспективная система для реализации работающего при комнатной температуре квантового компьютера [17]. Структура их энергетических уровней напоминает структуру уровней свободных атомов щелочных металлов – основное состояние содержит два сверхтонких подуровня с интервалом 2,8 ГГц, которые могут служить двумя рабочими уровнями кубита, и, кроме того, из этих подуровней имеется узкий оптический переход на длине волны 637 нм в первое возбужденное состояние, имеющее время жизни около 10 нс. Этот переход может использоваться для индивидуальной адресации кубитов путем жесткой фокусировки резонансного лазерного излучения. Индивидуальная адресация требуется для записи и считывания информации, а также для выполнения квантовых операций над заданными кубитами посредством оптических рамановских переходов через возбужденное состояние в бихроматическом лазерном поле. Двухкубитовые квантовые операции над NV-центрами могут выполняться путем обмена фотонами при кратковременном лазерном возбуждении в долгоживущий верхний энергетический уровень, а также с использованием магнитодипольного взаимодействия между спинами ядер соседних NV-центров [17]. Основными фундаментальными задачами, которые решаются зарубежными исследователями в этом направлении, являются создание квантовых регистров в виде алмазных наноструктур с решетками одиночных NV-центров или их ансамблей, исследование оптических свойств отдельных NV-центров, а также изучение возможности экспериментальной реализации универсальных одно- и двухкубитовых квантовых логических операций над ними оптическими методами.

Таким образом, в настоящее время перспективными считаются два варианта кубитов: 1) одиночные нейтральные атомы щелочных металлов, захваченные в оптические пространственные решетки; 2) твердотельные кубиты на основе центров окраски (NV-центров) в кристаллах алмаза. Их преимуществом является то, что оба варианта допускают масштабирование до большого числа кубитов, упорядоченных в заданные пространственные структуры.

Среди перечисленных выше типов кубитов нейтральные атомы в оптических ловушках наиболее полно удовлетворяют критериям ДиВинченцо. Однако практическая реализация прототипа квантового компьютера на нейтральных атомах может столкнуться с рядом труд-

ностей, основными из которых являются сложность реализации детерминированной загрузки одиночных атомов в узлы оптических ловушек и длительного удержания их там, сложность реализации когерентного лазерного возбуждения ридберговских атомов в оптических ловушках для выполнения двухкубитовых операций и сложность выполнения последовательных квантовых операций над большим числом кубитов в квантовом регистре.

Статус прохождения стадий разработки квантовых вычислителей в мире

За рубежом имеется большое число научных групп и компаний, занимающихся созданием прототипа квантового компьютера. В настоящее время наиболее активные исследования ведут следующие группы:

– D. Wineland, NIST, USA, эксперименты с квантовым регистром кубитов на одиночных ионах Hg⁺ (статусы 1.1, 2.1–2.3, 3.1–3.3, 4.1, 4.7, 6.1, 6.2, 7.1, 7.4);

– C. Monroe, NIST, USA, эксперименты с квантовым регистром кубитов на одиночных ионах Yb⁺ (статусы 1.1, 2.1–2.3, 3.1–3.3, 4.1, 4.7, 6.1, 6.2, 7.1, 7.4);

– R. Blatt, Innsbruck University, Austria, эксперименты с квантовым регистром кубитов на одиночных ионах Ca⁺ (статусы 1.1, 2.1–2.3, 3.1–3.3, 4.1, 4.7, 6.1, 6.2, 7.1, 7.4);

– J. Du, University of Science and Technology, Hefei, China, эксперименты с квантовым регистром кубитов в сложных молекулах методом ЯМР (статусы 1.1, 2.1–2.3, 3.1–3.3, 4.7, 6.1, 6.2, 7.4);

– R. Laflamme, University of Waterloo, Canada, эксперименты с квантовым регистром кубитов в сложных молекулах методом ЯМР (статусы 1.1, 2.1–2.3, 3.1–3.3, 4.7, 6.1, 6.2, 7.4);

– D.G. Cory, University of Waterloo, Canada, эксперименты с кубитами на одиночных атомах фосфора в матрице кремния (статусы 1.1, 2.1);

– A. Morello, University of New South Wales, Australia, эксперименты с кубитами на одиночных атомах фосфора или кремния в твердотельных матрицах (статусы 1.1, 2.1);

– P. Bertet, Quantronics Group, CEA Saclay, France, эксперименты с одиночными сверхпроводниковыми кубитами (статусы 1.1, 2.1);

– I. Bloch, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, Germany, эксперименты с квантовым регистром кубитов на нейтральных атомах в оптических решетках (статусы 1.1, 2.1–2.3, 6.1);

– M. Saffman, University of Wisconsin-Madison, Madison, USA, эксперименты с квантовым регистром кубитов на нейтральных атомах в оптических дипольных ловушках (статусы 1.1, 2.1–2.3, 3.1, 3.2, 3.4, 6.1, 6.2).

Стадии разработки

1. Создание кубита. Демонстрация возможности приготовления и считывания двух состояний кубита.

2. Однокубитные операции:

– демонстрация возможности количественного контроля за процессом декогеренции;

– демонстрация времени когерентности намного большего чем период осцилляций Раби;

– демонстрация возможности управления обеими степенями свободы на сфере Блоха.

3. Двухкубитные операции:

– реализация когерентных двухкубитовых квантовых логических операций;

– генерация и характеристика запутанных состояний;

– демонстрация времени когерентности намного большего чем время работы квантового двухкубитного вентиля;

– томография квантового состояния и процесса взаимодействия двух кубитов;

– демонстрация существования субпространства без декогерентности для двух кубитов (decoherence-free subspace, DFS);

– демонстрация квантового двухкубитного алгоритма.

4. Операции над 3–10 физическими кубитами:
 - порождение Greenberger, Horne, and Zeilinger (GHZ) связанных состояний между тремя кубитами;
 - генерация максимально-связанных состояний четырех и более физических кубитов;
 - томография квантового состояния и процесса взаимодействия;
 - демонстрация DFS;
 - демонстрация передачи квантовой информации (телепортация и т.д.) между физическими кубитами;
 - демонстрация работы алгоритма/алгоритмов квантовой коррекции ошибок;
 - демонстрация простых квантовых алгоритмов (Дойча-Йожи и т.д.);
 - демонстрация квантовых логических операций с коррекцией ошибок для повышения точности с целью реализации масштабирования.
5. Операции над одним логическим кубитом:
 - создание одиночного логического кубита и продление времени жизни состояния с использованием периодической коррекции ошибок;
 - демонстрация возможности квантового управления одиночным логическим кубитом с коррекцией ошибок.
6. Операции с двумя логическими кубитами:
 - реализация логических операций;
 - генерация запутанных состояний Белла для двух логических кубитов;
 - демонстрация логических операций с коррекцией ошибок.
7. Операции с 3–10 логическими кубитами:
 - генерация GHZ-состояний для трех логических кубитов;
 - генерация максимально-связанных состояний четырех и более логических кубитов;
 - демонстрация передачи квантовой информации между логическими кубитами;
 - демонстрация простых квантовых алгоритмов (Дойча-Йожи Джоса и т.д.) с логическими кубитами;
 - демонстрация реализации простых квантовых алгоритмов с логическими кубитами и коррекцией ошибок.

Факторы сдерживания и ускорения разработки квантового компьютера в России

В ближайшие 5 лет в Российской Федерации необходимо начать исследования по физической реализации различных типов кубитов, представленных одиночными ионами, нейтральными атомами, квантовыми точками и примесными атомами в полупроводниках, точечными дефектами в алмазе, сверхпроводниковыми джозефсоновскими контактами и т.д. НИР должны вестись по всем этим направлениям с целью определения наиболее перспективных вариантов, на основе которых в дальнейшем может быть создан первый российский прототип квантового компьютера.

Поскольку в конечном итоге квантовый компьютер должен быть достаточно компактным и построен на основе твердотельных кубитов, значительные усилия следует направить на реализацию кубитов на квантовых точках и точечных дефектах. В то же время, с кубитами на ионах и нейтральных атомах будет проще и быстрее получить высокую точность квантовых вычислений и продемонстрировать возможность реализации простейших квантовых алгоритмов, поэтому они также должны получить поддержку для их реализации.

В ближайшие 10 лет должны быть выполнены НИОКР, направленные на создание и тестирование первого прототипа российского квантового компьютера. С учетом бурного роста числа экспериментальных работ по созданию квантового компьютера в мире, можно ожидать, что первый полноценный прототип квантового компьютера будет создан за рубежом в течение ближайших 10–15 лет. В интересах России является исключительно важным устранить отставание в этой области и создать прототип квантового компьютера не позднее, чем за рубежом.

Для достижения поставленных целей на 5–10 лет необходимо обеспечить проведение исследований по физической реализации кубитов и квантовых регистров на самой современной экспериментальной и технологической базе. Для твердотельных кубитов необходимо приобрести и запустить технологические установки с чистыми помещениями и высокой точностью исполнения нано- и микроструктур, а также средств их диагностики и пост-процессинга. Для атомов и ионов в ловушках необходимо обеспечить специальные сверхвысоковакуумные установки, управляющие лазеры с предельно узкими ширинами линий, системы оптической регистрации с предельной чувствительностью и разнообразные оптоэлектронные приборы с низкими потерями на поглощение и рассеяние. Также необходимо разработать и создать современные элементы интегральной фотоники на основе оптических волноводов для управления кубитами в квантовом регистре.

Для создания компактного прототипа квантового компьютера необходимо создать новые, максимально компактные устройства квантовой оптики. Например, узкополосные лазерные источники в настоящее время реализуются с применением громоздких внешних интерферометров. Для создания компактных узкополосных лазеров необходимо создать соответствующие изделия интегральной оптики и перейти на малогабаритные полупроводниковые лазеры со встроенными интерферометрами. Также, для индивидуальной оптической адресации к отдельным кубитам, необходимо разработать и создать малогабаритные оптические интерфейсы высокого качества. Представляет интерес и развитие малогабаритных систем построения изображений и счетчиков фотонов.

Физические методы, используемые при реализации прототипа квантового компьютера, в полной мере могут быть затем использованы в других квантовых технологиях – квантовой криптографии, квантовых сенсорах и оптических атомных стандартах частоты. Например, применение перепутанных квантовых состояний может улучшить точность измерений в квантовых сенсорах и стандартах частоты, а в системах квантовой криптографии – увеличить степень защищенности и быстродействие. В прототипах квантового компьютера могут быть найдены и другие полезные элементы – источники и детекторы одиночных фотонов, узкополосные лазеры, элементы интегральной оптики и т. д.

Практическая реализация квантовых компьютеров потребует новых теоретических исследований, направленных на оптимизацию и адаптацию квантовых алгоритмов применительно к конкретной физической реализации кубитов и квантового регистра. В ряде случаев вместо стандартных алгоритмов квантовых вычислений могут оказаться полезными альтернативные «топологические» квантовые вычисления [18], а также квантовые симуляторы для определенных типов квантовых регистров [19].

Заключение. Создание квантового компьютера позволит решать математические и физические задачи, для которых на обычных компьютерах потребовались бы десятки и сотни лет. В частности, задача факторизации (разложение большого числа на простые множители), которая является основой современной криптографии, может быть решена за время, степенным образом зависящее от длины числа, в отличие от экспоненциально большого времени, требуемого классическим компьютером. Разработаны также эффективные квантовые алгоритмы для быстрого поиска в больших базах данных, решения ряда математических задач и моделирования физических объектов с большим числом взаимодействующих частиц. Во многих странах мира ведутся работы по созданию алгоритмов и элементной базы квантовых вычислений, в том числе и в военных целях. Считается, что введение в состав бортовой аппаратуры элементов, реализующих квантовые алгоритмы решения и распараллеливания вычислений, позволит повысить оперативность и точность управления образцами ВВСТ.

Список литературы (References)

1. Feynman R.P., *Int. J. Theor. Phys.* 21, 467 (1982).
2. DiVincenzo D.P., *Science* 270, 255 (1995).

3. DiVincenzo D.P., Fortschr. Phys. 48, 771 (2000).
4. Vandersypen L.M.K., Chuang I.L., Rev. Mod. Phys. 76, 1037 (2004).
5. Leibfried D. et al., Rev. Mod. Phys. 75, 281 (2003).
6. Loss D., DiVincenzo D.P., Phys. Rev. A. 57, 120 (1998).
7. Makhlin Y., Schön G., Shnirman A., Rev. Mod. Phys. 73, 357 (2001).
8. Lu D. et al., arXiv:1501.01353.
9. Wineland D.J., Rev. Mod. Phys., 85, 1103 (2013).
10. Brennen G.K. et al., Phys. Rev. Lett. 82, 1060 (1999).
11. Grimm R. et al., Adv. At. Mol. Opt. Phys. 42, 95 (2000).
12. Weitenberg C. et al., Nature, 471, 319 (2011).
13. Yavuz D.D. et al., Phys. Rev. Lett., 96, 063001 (2006).
14. Weitenberg C. et al., Nature, 471, 319 (2011).
15. Isenhower L. et al., Phys. Rev. Lett. 104, 010503 (2010).
16. Fuchs G.D. et al., Nature Phys. 6, 668 (2010).
17. Neumann P. et al., Nature Phys. 6, 249 (2010).
18. Devitt S.J., arXiv:1405.4943v1.
19. Johnson T.H. et al., arXiv:1405.2831v1.