

*ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА***М. П. МАЛЫХИНА, Д. А. ГЕРАСИМОВ**

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

В настоящее время существует множество теоретических моделей физической реализации квантового компьютера. В данной статье рассматриваются основанные из них, наиболее перспективные (подчас взаимосвязанные) технологии с точки зрения возможности практической реализации квантового компьютера. В статье показана их связь между собой на примере анализа результатов работы различных исследовательских групп: например, двух научных коллективов под руководством Кристиана Де-Греве из Стэнфордского университета и Атача Имамоглу из Института квантовой электроники в Цюрихе, а также интенсивных экспериментальных работ в национальной лаборатории Лос-Аламос и национальном институте стандартов и технологий в США, группы Евгения Демлера из Гарвардского университета и других коллективов, управлением спином электрона совместными усилиями превратившими квантовую точку в кубит. В статье также приводятся результаты анализа их применения и приблизительная оценка положительных и отрицательных сторон каждой технологии.

Ключевые слова: Куперовские пары, квантовый компьютер, кубит, спин, квантовые точки, сверхпроводники, физическая реализация.

Квантовые точки (от англ. quantum dots (QD)) часто называют искусственными атомами. Интерес к этим объектам проявляется ввиду наличия возможности эффективно управлять их спектральными свойствами за счет выбора химического состава, а также за счет того, что свойства квантовых точек можно менять непрерывно путем изменения их формы и размеров.

В экспериментальных исследованиях встречаются два типа квантовых точек: точки, полученные путем хаотической самоконденсации Странского - Крастанова, и точки, формируемые в гетероструктурах на основе двумерного электронного газа путем электростатического контроля. Квантовые точки используются в генераторах неразличимых одиночных фотонов для протоколов квантовой криптографии, лазерах терагерцевого диапазона, одноэлектронных транзисторах. Также на основе квантовых точек возможно создание масштабируемых твердотельных квантовых регистров на базе уже существующих полупроводниковых технологий [1].

При изучении работы неподвижного кубита на базе квантовых точек два научных коллектива под руководством Кристиана Де-Греве из Стэнфордского университета и Атача Имамоглу из Института квантовой электроники в Цюрихе научились передавать информацию между двумя типами квантовых ячеек памяти. Квантовые точки поместили в специальную трехмерную яму, в следствие чего в момент нахождения внутри ямы электрон не может самостоятельно вылететь оттуда. Это было сделано для ограничения передвижения квантовых точек. Для передачи состояния кубита ученые сначала накачивали электрон в центре квантовой точки при помощи коротких импульсов лазера, из-за чего электрон переходил со дна ямы на более высокие энергетические уровни. После завершения цикла накачки квантовых точек происходит выброс одиночного фотона, цвет и поляризация которого связаны со спином электрона. Полноценная передача информации от квантовых точек к фотону возможна лишь в том случае, если спин электрона связан лишь с одним, а не двумя свойствами фотона. Таким образом, исследовательские группы превратили квантовую точку в кубит, управляя спином электрона, который принимает условное значение "вверх" или "вниз". Данный тип кубит может долгое время сохранять состояние когерентности, однако ее передача затруднена тем, что квантовые точки неподвижны по своей природе. Обе группы решили эту проблему одинаковым образом. Они приспособили второй тип кубитов в виде фотона для передачи информации. Таким образом, возможно использовать электрон как источник света или носитель информации. В последствии группа под руководством Де-Греве избавилась от связи между спином электрона и цветом фотона, а группа под руководством Имамоглу от связи между спином и поляризацией [2]. Научным исследованием под руководством Кристиана Де-Греве и Атача Имамоглу произведено построение квантовых точек и применение кубитов с помощью MOT.

MOT - это магнитно - оптическая ловушка; это устройство, которое используется для лазерного охлаждения и магнитно - оптического захвата, с помощью которого получают нейтральные атомы при температурах,

приближенных к абсолютному нулю. Возбуждение коллективного движения заряженных ионов приводит к их взаимодействию в ловушках, а при помощи лазеров инфракрасного диапазона осуществляется индивидуальное управление над МОТ. Первые теории физической реализации данного подхода в квантовом компьютере были предложены И. Цираком и П. Цоллером в 1995 году [3]. В настоящее время интенсивные экспериментальные работы ведутся в национальной лаборатории Лос-Аламос и национальном институте стандартов и технологий в США. Преимущество данного подхода состоит в простом индивидуальном управлении отдельными кубитами. Основными недостатками этой технологии являются необходимость обеспечения устойчивости состояний ионов в цепочке и ограниченность возможного числа кубитов. В отличие от ловушек Пеннинга и Пауля, которые могут работать только с заряженными частицами, данный метод позволяет захватывать нейтральные атомы. В представленной технологии не получится выполнять произвольные квантовые алгоритмы. По этой причине данная технология подойдет для создания квантовых симуляторов. Эти устройства будут решать одну, строго определенную задачу с набором параметров, которые можно контролировать.

Квантовые симуляторы будут востребованы в процессе создания новых материалов. Так, квантовый симулятор позволит рассчитать сильно взаимодействующие конденсированные системы и сложные кристаллы. На них будет удобно быстро перебирать большое количество параметров, на что обычным компьютерам просто не хватит мощностей. Евгений Демлер из Гарвардского университета стал одним из первых, кто увидел в данном подходе необходимость для создания новых материалов. Одной из возможных сфер применения является синтез принципиально новых высокотемпературных сверхпроводников [4].

Компания D-Wave реализовала квантовый компьютер, используя технологии производства полупроводников. В квантовом чипе D-Wave присутствует материал ниобий, который при охлаждении до сверхнизкой температуры превращается в сверхпроводник. Когда обычный металл проводит

электрический ток, электроны, а также носители электрического заряда, сталкиваются с неидеальной структурой металла, в результате чего появляется сопротивление. При охлаждении сверхпроводящего металла ниобия, электроны металла формируют Куперовские пары, в которых движение одного электрона соответствует равному, но противоположному движению спаренного электрона и таким образом предотвращает электроны от столкновений с неидеальной структурой и образования сопротивления. Таким образом, электроны могут свободно протекать, без необходимости в дополнительном токе. Ниобий расположен в виде колец, через которые ток может протекать по часовой стрелке, против неё или смешанно. Чип представляет собой последовательность металлических дорожек на кремниевой подложке, но сверху расположены слои металла, разделённые изолятором. В данном случае вся информация хранится в виде направлений течения тока по металлическим петлям и переходам.

После объединения в пару импульсы электрона всегда строго равны по величине, поэтому измениться они могут только одновременно и одинаково, а так как одновременно рассеяться на неоднородностях кристаллической решётки невозможно, они продолжают движение и не имеют сопротивления. Когда Куперовские пары входят в переходы Джозефсона на чипе их можно представить, как электронно подобные квазичастицы, которые туннельно проходят через изолятор в переходе, эффективно проводя через него ток.

Таким образом, компания D-Wave показала, что с помощью применения полупроводников можно получить сверхпроводник, который как раз в качестве логических кубитов использует присутствие или отсутствие Куперовской пары в определённой пространственной области, а также переходы Джозефсона в сверхпроводниках.

Куперовской парой называют связанное состояние двух взаимодействующих через фонон электронов, обладающих нулевым спином и зарядом, равным удвоенному заряду электрона. Впервые подобное состояние было описано Леоном Купером в 1956 году, рассмотревшим лишь упрощённую двухчастичную задачу. Коррелированные пары электронов ответственны за

явление сверхпроводимости. А принцип физической реализации квантового компьютера на основе зарядовых состояний Куперовских пар основан на использовании в качестве кубитов зарядовых состояний Куперовских пар в квантовых точках, связанных переходами Джозефсона, был предложен Авериным в 1998 году. Первый твердотельный кубит, который был разработан с помощью данной технологии, в NEC в Японии в 1999 году. Перспективность направления Куперовских пар состоит в возможности создания электронных квантовых устройств высокой степени интеграции на одном кристалле. При этом для управления кубитами не потребуются лазерные установки или установки ядерно - магнитного резонанса. Первой физической реализацией квантового компьютера является устройство импульсного ядерного - магнитного резонанса с отдельными кубитами [5].

Сверхпроводниковые кубиты отличаются от других технологий физической реализации квантового компьютера возможностью массового масштабирования кубитов на электронном чипе как обычные элементы в современной микро- и нанoeлектронике. В данный момент разработкой систем с использованием сверхпроводников занимаются большие коммерческие компании, такие как компания D-Wave, а также IBM, которая занимается разработкой чипов на сверхпроводниках и решением проблемы коррекции ошибок. Компания Microsoft занимается разработкой программных продуктов. А компания Google не только купила квантовый компьютер D-Wave, но и создала собственную лабораторию меньше года назад, куда переманила всю команду из группы Джона Мартинса из Калифорнийского университета Санта-Барбары. В исследовательской лаборатории Google на основе сверхпроводников разрабатывают простые квантовые устройства, которые в перспективе станут компонентами квантовых процессоров. Джон Мартинс является экспертом в сверхпроводниках и принимал участие в разработке модели квантового компьютера на вакансиях в алмазах. Данный научный эксперимент проводился в апреле 2012 года группами исследователей из Южно-Калифорнийского университета, Дельфтского Технологического университета, университета

штата Айова и Калифорнийского университета в Санта-Барбаре. Им удалось реализовать двухкубитный квантовый компьютер на кристалле алмаза с примесями [6]. Получившийся квантовый компьютер функционировал при комнатной температуре и в теории является масштабируемым. В качестве двух логических кубитов использовались направления спина электрона и ядра азота. Для обеспечения защиты от влияния декогерентности была разработана целая система, которая формировала импульс микроволнового излучения определенной длительности и формы. При помощи данной разработки был реализован алгоритм Гровера для четырёх вариантов перебора, что позволило получить правильный ответ с первой попытки в 95% случаев.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что для использования полноценного квантового компьютера необходимо не 40, а намного больше кубит. По этой причине подход МОТ является основным для реализации квантовых симулянтов, так как в данном подходе возможно симулировать до 40 кубит. На кристалле алмаза с примесями существует возможность массового масштабирования, но этот подход не будет являться самым дешевым и по этой же причине не будет пользоваться особым спросом. В представленной работе были отображены различные подходы для реализации квантового компьютера, но наиболее подходящей возможностью физической реализации квантового компьютера выступает подход на основе сверхпроводников. Причиной тому является более развитое направление ввиду возможности его масштабирования на чипе по примеру современных компьютеров, а также ввиду того, что все большее внимание на данный момент уделяется именно этому подходу. Помимо этого, именно сверхпроводниками занимается IBM и Google, а компания D-Wave пытается создать квантовый компьютер на сверхпроводниках. Росатом, ФПИ и Минобрнауки в конце 2016 года начали создавать пилотный проект под названием "Создание технологии обработки информации на основе сверхпроводящих кубитов", который рассчитан на 3 года, а сумма вложений в проект составляет 750 миллионов рублей. Для создания квантового компьютера не существует физических

запретов, для построения эффективного квантового компьютера необходимо лишь преодолеть технологические трудности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др. Введение в физику поверхности / Под ред. В. И. Сергиенко. — М.: Наука, 2006. — 490 с.

2. К. Де-Греве А. Имамоглу, Quantum dot spin photon entanglement via frequency down conversion to telecom wavelength, Nature, выпуск 491, 2012 г., — 421 с.

3. Д.А. Джонс, Fortschr. Phys., выпуск.48, 2000 г., P. — 924 с.

4. М. П. Малыхина., Д. А. Герасимов., Основные стадии развития квантового компьютера, VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 55-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. 2016 г.

5. С. Похомов, Квантовый компьютер, КомпьютерПресс, выпуск 5, 2007 г.

6. М. П. Малыхина., Д. А. Герасимов., История развития и современное состояние квантового компьютера, Научные труды КубГТУ, № 3, 2016 г.

REFERENCES

1. Oura K., Lifshits V. G., Saranin A. A. i dr. Vvedenie v fiziku poverkhnosti / Pod red. V. I. Sergienko. — M.: Nauka, 2006. — 490 s.

2. K. De-Greve A. Imamoglu, Quantum dot spin photon entanglement via frequency down conversion to telecom wavelength, Nature, vypusk 491, 2012 g., — 421 s.

3. D.A. Dzhons, Fortschr. Phys., vypusk.48, 2000 g., P. — 924 s.

4. M. P. Malykhina., D. A. Gerasimov., Osnovnye stadii razvitiya kvantovogo kompyutera, VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh, posvyashchennaya 55-y godovshchine poleta Yu.A. Gagarina v kosmos. 2016 g.

5. S. Pokhomov, Kvantovyy kompyuter, KompyuterPress, vypusk 5, 2007 g.

6. М. П. Мalykhina., D. A. Gerasimov., Istoriya razvitiya i sovremennoe sostoyanie kvantovogo kompyutera, Nauchnye trudy KubGTU, № 3, 2016 g.

THE PHYSICAL TECHNOLOGY 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*

At this time, there are many theoretical models of the physical implementation of a quantum computer. This article discusses based of them, the most promising (sometimes interrelated) technologies from the point of view of possibility of practical realization of a quantum computer. The article shows their relationship to each other by analyzing the findings of the different research groups: for example, two research teams headed by Christian De Greve from Stanford University and Ataca Imamoglu Institute of quantum electronics in Zurich, as well as intensive experimental work at the national laboratory at Los Alamos and The National Institute of Standards and Technology in the United States, the group of Eugene Demler from Harvard University and other groups control the spin of an electron to the joint efforts of turning a quantum dot in the qubit. The article also provides an analysis of their application and estimation of the positive and negative sides of each technology.

Key words: Cooper pair, quantum computer, qubit, spin, quantum dots, superconductors, physical implementation.