



Физическая реализация кубитов в квантовых вычислениях

Не первый год в компании «ЛЛС» продолжает активно развиваться направление квантовых технологий. Совместно с ведущими университетами и исследовательскими центрами России разрабатываются и реализуются новые подходы к развитию систем квантовой криптографии и квантовых вычислений. Последнее является одним из самых приоритетных направлений современной техники и науки не только в России, но и в мире. В рамках поиска способов масштабирования квантовых систем и повышения их стабильности непрерывно расширяются вычислительные возможности созданных квантовых компьютеров, увеличивается количество используемых кубитов, модернизируются системы поддержания кубитной когерентности, ведутся поиски оптимальной технологии изготовления многокубитных архитектур.

Однако на данный момент существует ряд трудностей, с которыми приходится сталкиваться ученым и инженерам, они связаны с несовершенством используемых технологий. В статье для более глубокого понимания вопроса и препятствий, лежащих на пути его решения, освещается как понятие кубита, так и тема его физической реализации.

ВВЕДЕНИЕ

Современные вычислительные системы оперируют информацией, представленной в виде двоичного кода. Информация в любом пакете данных представлена в виде последовательности битов, которые могут принимать строго определенные значения – 1 или 0. С этими битами возможно выполнение различных логических (битовых) операций. Именно битовые операции (рис. 1) в сочетании с запоминающими элементами реализуют все богатство возможностей современной цифровой техники.

Однако после развития теории квантовой механики в начале XX века ученые и инженеры стали предпринимать попытки применить новую область физики к тем или иным прикладным задачам, в том числе и к информатике. Действительно, ведь в отличие от хорошо знакомой классической физики в квантовой механике находят свое проявление эффекты, которые зачастую контринтуитивны и имеют потенциально вероятностный характер (рис. 2). Так, например, в квантовой механике возможно существование систем, которые как и классические биты могут находиться не только в двух хорошо определенных состояниях, но и в состоянии суперпозиции этих состояний – $c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$.

В итоге состояние квантовой системы может быть записано как $|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$, коэффициенты c_0 и c_1 называются амплитудами вероятности, и их квадрат отражает вероятность, с которой при изме-

рении квантовой системы мы найдем ее в том или ином состоянии.

Например, если состояние системы описывается следующим образом:

$$|\psi\rangle = \frac{\sqrt{3}}{2}|0\rangle + \frac{1}{2}|1\rangle,$$

то вероятность обнаружить систему $|\psi\rangle$ в состоя-

нии $|0\rangle$ будет равна $\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 = \frac{3}{4} = 75\%$, а в состоянии $|1\rangle$

будет равна $\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} = 25\%$.

Так как подобные квантовые системы допускают свое существование не только в двух состояниях $|0\rangle$ и $|1\rangle$, но в отличие от битов и в суперпозиции этих состояний, такие системы называют квантовыми битами или сокращенно – кубитами. Также важное отличие кубита от классического бита состоит в том, что при измерении состояние кубита необратимо изменяется, чего не происходит при измерении классического бита. Измерение необратимо влияет на любую квантовую систему, которая коллапсирует и принимает какое-то определенное значение с той или иной вероятностью.

В силу нормировки сумма $|c_A|^2 + |c_B|^2$ равна 1 и кубит можно параметризовать, используя основное тригонометрическое тождество $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$:

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle = \underbrace{\cos\frac{\theta}{2}}_{c_0}|0\rangle + e^{i\varphi}\underbrace{\sin\frac{\theta}{2}}_{c_1}|1\rangle.$$



Оператор отрицания «НЕ»

На той позиции, где был бит 0, в результате будет бит 1, и наоборот.

$$0 \xrightarrow{\text{НЕ}} 1; 1 \xrightarrow{\text{НЕ}} 0$$

Оператор «И»

Если оба бита равны 1, результат применения оператора будет равен 1. Если хотя бы один бит из входной пары равен 0, результат будет 0.

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{И}} 1; \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{И}} 0$$

Оператор «ИЛИ»

Если оба бита на входе равны 0, результат применения оператора равен 0. Если же хотя бы один бит из входной пары равен 1, результат будет 1.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{ИЛИ}} 0; \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{ИЛИ}} 1$$

Оператор «Исключающее ИЛИ»

Если оба бита на входе равны между собой, результат применения оператора будет равен 0. В противном случае, на выходе бит примет значение 1.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Искл. ИЛИ}} 0; \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Искл. ИЛИ}} 0;$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Искл. ИЛИ}} 1; \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Искл. ИЛИ}} 1$$

Рис. 1. Некоторые основные битовые операции

В результате этого появляется два параметра θ и ϕ , принимающие значения $0 - \pi$ и $0 - 2\pi$ соответственно. Таким образом, оказывается, что состояние кубита можно наглядно представить в виде вектора, отложенного на сфере Блоха (рис. 3).

Здесь θ и ϕ это два угла поворота вектора состояния кубита. На сфере хорошо выделяются шесть точек пересечения сферы с координатными осями. В этих точках находятся ортогональные состояния кубитов, описываемые следующим образом:

$$\begin{aligned} |0\rangle; |+\rangle &= \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}; |i+1\rangle = \frac{|0\rangle + i|1\rangle}{\sqrt{2}} \\ |1\rangle; |-\rangle &= \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}; |i-1\rangle = \frac{|0\rangle - i|1\rangle}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Кубиты могут быть запутаны друг с другом. Квантовой запутанностью могут обладать два и более кубита, и она выражается в наличии особой корреляции между ними, которая невозможна

в классических системах. Одним из наиболее простых примеров запутанности двух кубитов являются состояния (или базисы) Белла:

$$\begin{aligned} |\Psi_{00}\rangle &= \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} & |\Psi_{01}\rangle &= \frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}} \\ |\Psi_{10}\rangle &= \frac{|00\rangle - |11\rangle}{\sqrt{2}} & |\Psi_{11}\rangle &= \frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Запись $|00\rangle$ обозначает состояние, когда оба кубита находятся в состоянии $|0\rangle$. Для состояний

Использованная выше запись в скобках $|x\rangle$ называется нотацией Дирака, которая вводит определенный математический формализм для описания квантовых систем. Так в нотации Дирака используются векторы Бра и кет (англ. bra-ket – bracket скобка), представляющие собой следующие структуры:

$$\text{Бра-вектор: } \langle \psi | = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*); \text{ Кет-вектор: } |\psi\rangle = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

Каждому кет-вектору $|\psi\rangle$ ставится в соответствие комплексно-сопряженный бра-вектор $\langle \psi |$. Над этими векторами возможно осуществление стандартных операций по правилам, которые также используются и при работе с обычными векторами:

Сложение: $|A\rangle = |B\rangle + |C\rangle$

Умножение: $|A\rangle = c \cdot |B\rangle$

Сопряжение: $|\psi\rangle = c_A |A\rangle + c_B |B\rangle \Leftrightarrow c_A^* \langle A| + c_B^* \langle B|$

Произведение: $\langle A|B\rangle = C \Leftrightarrow \langle B|A\rangle = C^*$
 $\langle A| \cdot \{|C\rangle + |B\rangle\} = \langle A|C\rangle + \langle A|B\rangle$
 $\{|A\rangle + |B\rangle\} \cdot |C\rangle = \langle A|C\rangle + \langle B|C\rangle$
 $\langle A|c|B\rangle = c \langle A|B\rangle$

Ортогональность: $\langle A|B\rangle = 0 \rightarrow |A\rangle$ и $|B\rangle$ ортогональны

Норма: $\|\psi\rangle = \sqrt{\langle \psi|\psi\rangle}$; стандартная нормировка $\langle \psi|\psi\rangle = 1$

Скалярное произведение бра-вектора с кет-вектором (а точнее, действие бра-вектора на кет-вектор) записывается в виде $\langle \psi|\psi\rangle$. На векторы, описывающие состояния системы, когда это возможно, накладыва-ется условие нормировки $\langle \psi|\psi\rangle = 1$.

Рис. 2. Математический формализм для описания квантовых систем

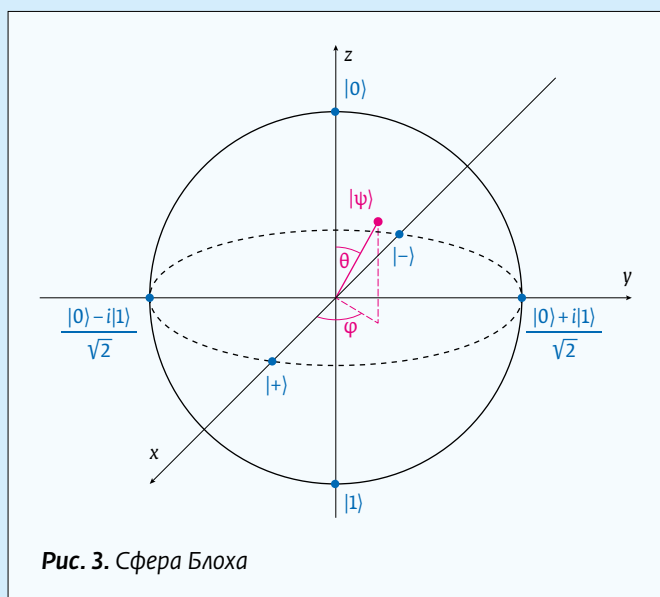


Рис. 3. Сфера Блоха

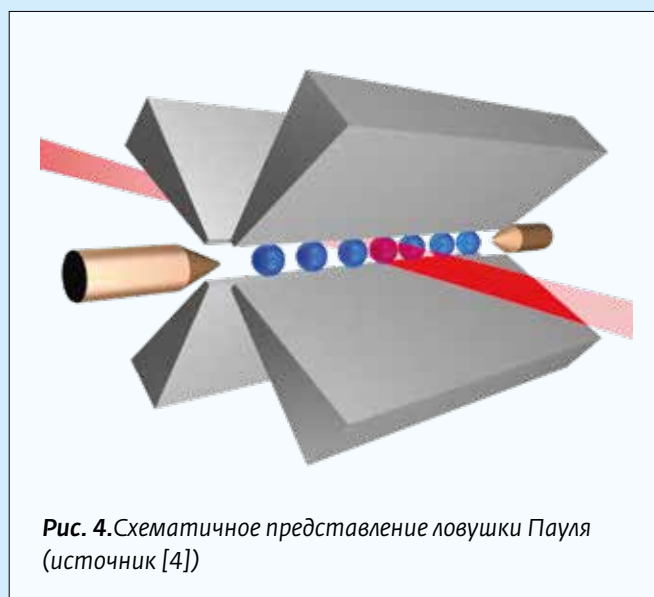


Рис. 4. Схематичное представление ловушки Пауля (источник [4])

Белла характерно то, что в результате акта измерения первого кубита возможны два результата:

- 0 с вероятностью 50% и конечным состоянием $|00\rangle$,
- 1 с вероятностью 50% и конечным состоянием $|11\rangle$.

Как следствие, измерение второго кубита всегда дает тот же результат, что и измерение первого кубита, т.е. данные измерений оказываются взаимозависимыми.

ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ КУБИТНЫХ СИСТЕМ

Но что может служить физическим проявлением кубитов в реальных системах? На самом деле это может быть любой объект, способный проявлять основные квантовые свойства, включая описанные выше. На сегодняшний день существует четыре основные технологии, в той или иной мере реализующие кубитные архитектуры:

1. «Ионы в ловушке»;
2. «Нейтральные атомы»;
3. «Фотонные чипы»;
4. «Сверхпроводники».

Первая технология «Ионы в ловушке» – это ионы в электромагнитной ловушке, называемой ловушкой Пауля (рис. 4). Такая ловушка генерирует в малом участке пространства внутри себя особым образом расположенные по отношению друг к другу электромагнитные поля. Это приводит к тому, что помещаемые в данное пространство заряженные частицы возможно нака-

пливать и удерживать длительное время внутри ловушки.

На рис. 5 показана созданная с помощью специальных систем формирования изображения фотография захваченных внутри ловушки ионов иттербия $^{174}\text{Yb}^+$, выстроенных в цепочку.

Такое расположение ионов позволяет легко ими манипулировать и адресно возбуждать. По двум измерениям ионная цепочка модулируется с помощью импульсных лазеров, а вдоль третьей оси удерживается с помощью постоянного электрического поля. Уже сейчас с помощью трехмерных ловушек удастся выстраивать довольно длинные, до 22 ионов, цепочки, но эффективно управлять их состояниями получается лишь для цепочки из пяти ионов.

При масштабировании системы до большего количества ионов возникает проблема декогерен-



Рис. 5. Фотография семи захваченных ионов в ловушке Пауля (источник [5])

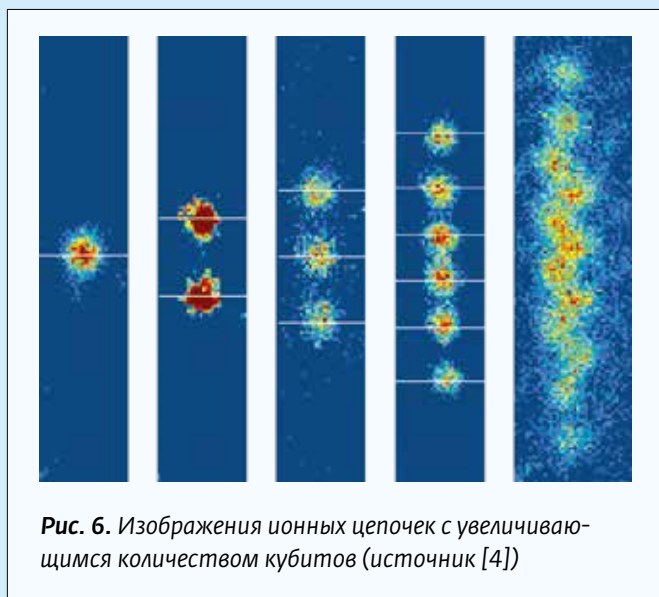


Рис. 6. Изображения ионных цепочек с увеличивающимся количеством кубитов (источник [4])

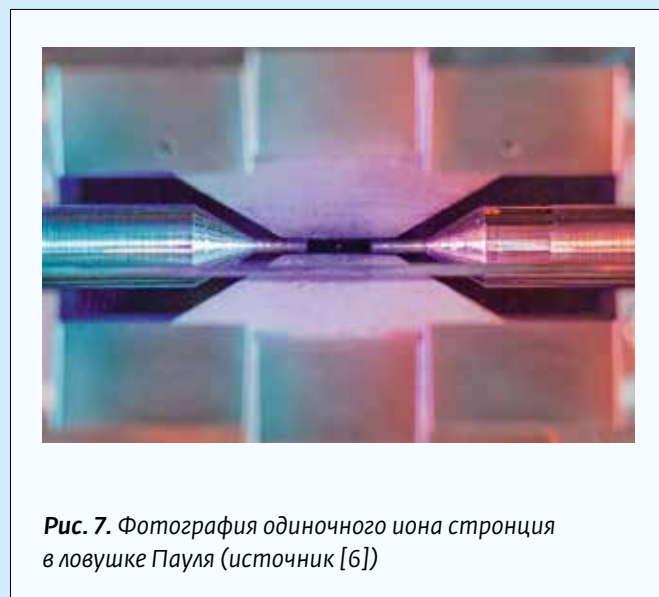


Рис. 7. Фотография одиночного иона стронция в ловушке Пауля (источник [6])

ции, осложняющей, а по итогу делающей невозможной, корректную работу квантового вычислителя. На рис. 6 хорошо видно, как изменяются области максимальной флуоресценции ионов магния. Чем больше ионов загружается в ловушку, тем они сильнее сближаются, и 12-ионная цепочка превращается уже в относительно слабо различимое в зигзагообразное образование. На рис. 7 приведена фотография ловушки Пауля с заключенным в ней единичным ионом стронция [6]. Снимок сделан через окно в вакуумной камере, в которой расположена ионная ловушка.

Технология «Нейтральные атомы» использует в качестве кубитов нейтральные атомы. Нейтральные атомы в отличие от ионов не имеют заряда, поэтому возможность захватывать их в электромагнитные ловушки отсутствует. Для формирования массива из нейтральных атомов и манипуляции ими используют т.н. лазерный пинцет – устройство, позволяющее манипулировать очень малыми по размеру объектами с помощью сфокусированного лазерного пучка. Для формирования матрицы нейтральных атомов (рис. 8) используется набор оптических пинцетов, который формируется с помощью специальной микрооптики и массива микролинз (рис. 9).

После захвата атомов в оптическую матрицу и их упорядочивания производится адресное возбуждение атомов лазерными импульсами. Такая система все еще обладает некоторыми проблемами, связанными с декогеренцией, однако она может включать в себя уже значительно большее количество кубитов, чем ионные ловушки. Тем не менее, как и ионные ловушки, у этих систем с нейтральными атомами по-прежнему сохраняются проблемы с масштабированием. К сожалению, на данный момент потеря когерентности и технические ограничения затрудняют увеличение размерности кубитных матриц.

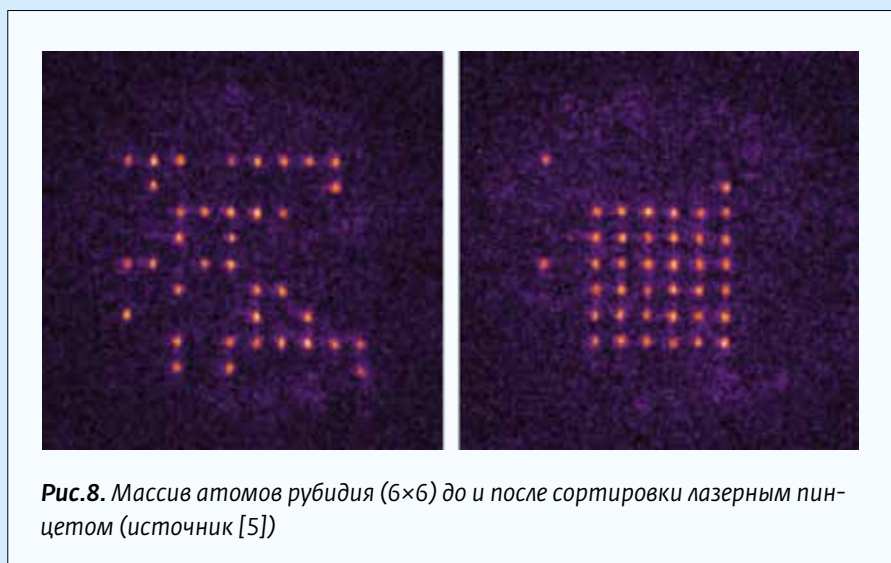


Рис.8. Массив атомов рубидия (6×6) до и после сортировки лазерным пинцетом (источник [5])

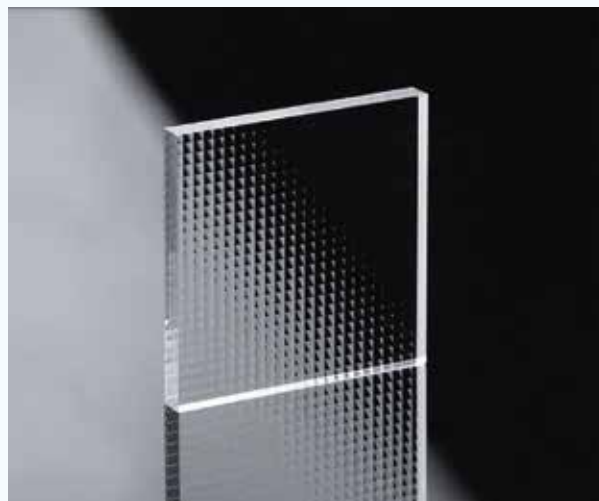


Рис. 9. Массив микролинз (источник [7])

Технология создания кубитных систем «Сверхпроводники» основана на использовании эффекта Джозефсона. Устройства также называют сверхпроводящие полупроводниковые чипы или джозефсоновские контакты (рис. 10). Эффект Джозефсона – это явление протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. Джозефсоновские контакты проявляют эффекты из области квантовой механики в обычном, не атомном масштабе (например квантование энергии). Это обстоятельство позволяет использовать такие контакты в качестве кубитов.

Преимущество данной технологии проявляется в том, что она базируется на уже хорошо развитой в мире технологии создания полупроводниковых чипов. Контакты имеют макроскопический размер, и их можно группировать на чипах. Однако из-за необходимости создания сверхпроводимости в этих структурах работа джозефсоновских контактов осуществляется лишь при криогенных температурах, что не позволяет создавать компактную установку, а присутствующая декогеренция ограничивает увеличение числа контактов на чипе.

Технология «Фотонные чипы» (рис. 11) при создании кубитных систем в качестве кубитов использует кванты света. Фотонные интегральные схемы, выполняющие логические операции, содержат каналы, по которым распространяются оптические фотоны. На основе этих чипов в перспективе можно создавать фотонную логику по аналогии с уже существующей компьютерной логикой.

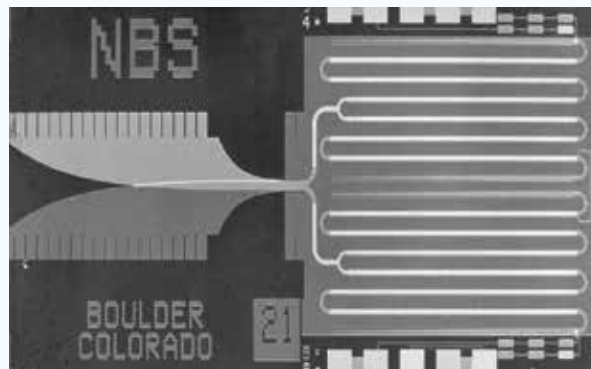


Рис. 10. Чип с джозефсоновским контактом (источник [8])

Функции переключения можно реализовать нелинейными оптическими эффектами, вызываемыми управляющим оптическим сигналом.

Возможность работы при комнатных температурах и чрезвычайно высокая скорость работы (по сути световая) составляют преимущества технологии фотонных чипов, которая находится в стадии бурного развития. При реализации фотонной логики необходимо сформировать оптические резонаторы, увеличивающие энергию пучка генерируемых фотонов до величин, вызывающих нелинейные эффекты. Размеры резонаторов влияют на масштабирование данных систем.

Любая кубитная система лишь в том случае может считаться полноценным квантовым вычислителем, если соответствует набору из пяти критериев, которые называются критериями Ди Винченцо:

1. Физическая кубитная система должна хорошо масштабироваться и предоставлять доступ

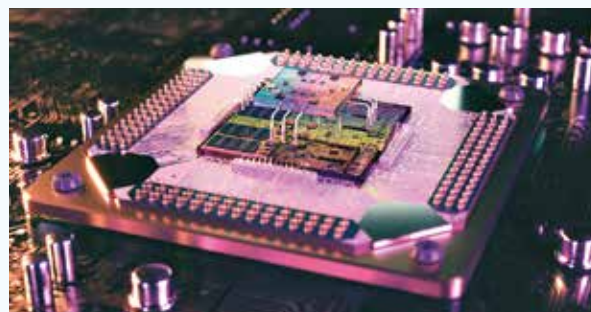


Рис. 11. Фотонный чип (источник [9])



к каждому кубиту для его адресной характеристики.

2. Должна существовать возможность инициализировать начальное состояние кубитов до простого реперного состояния.
3. Характерное время когерентности кубитов должно быть значительно больше, чем время совершения логической операции.
4. Должны быть условия для реализации в системе универсального набора логических квантовых операций, называемых «квантовыми вентилями».
5. Система должна обеспечивать возможность считывания результата в конце проведения расчета (провести измерение).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке квантовых вычислителей упор делают на четыре современные технологии создания кубитных архитектур. Но системы, выполненные по каждой из этих технологий, лишь частично отвечают критериям Ди Винченцо, так как их реализация имеет чисто технические ограниче-

ния. На данный момент выделить какую-либо из них в качестве преобладающей и оценить, на чьей основе будет создан первый в мире полноценный квантовый компьютер, невозможно.

С. Н. Мосенцов, Н. В. Буров
АО «ЛЛС», Санкт-Петербург, Россия

REFERENCES

1. **Львовский А.** Отличная квантовая механика. – М.: Альпина нон-фикшн. 2021. – 424 с.: ISBN 978-5-91671-952-9.
2. **Коваленко И. И., Прилипко В. К.** Физические основы квантовых вычислений. Динамика кубита. – СПб.: Лань/ 2019. – 214 с.: ISBN 978-5-8114-3383-4.
3. **Кронберг Д. А., Ожигов Ю. И., Чернявский А. Ю.** Квантовая информатика и квантовый компьютер. – М.: МАКС Пресс. 2011. ISBN 978-5-89407-452-8.
4. В погоне за миллионом кубитов. URL: <https://naked-science.ru/article/physics/v-pogone-za-millionom-kubitov?amp>
5. Квантовое преследование. Зачем в России занялись кубитами на холодных атомах и ионах. URL: <https://nplus1.ru/material/2021/09/09/quantum-pursuit>
6. URL: <https://nplus1.ru/news/2018/02/13/signle-atom-photo>.
7. URL: <https://www.focuslight.com/product/component/micro-optical-component/microlens-array/homogenizer>.
8. **Hamilton C., Kautz R., Steiner R., Lloyd F.** A Practical Josephson Voltage Standard at One Volt. IEEE Electron Device Letters. 1985; EDL-6: 623–625. DOI: 10.1109/EDL.1985.26253.
9. NIST Launches Consortium to Support Development of Quantum Industry. URL: <https://www.nist.gov/news-events/news/2018/09/nist-launches-consortium-support-development-quantum-industry>.



НЕВСКАЯ
ФОТОНИКА

ИТМО

Приглашаем принять участие во Всероссийской научной конференции с международным участием «Невская Фотоника – 2023», которая будет проходить в Университете ИТМО в городе Санкт-Петербурге с 9 по 13 октября 2023 года.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

- Индустриальная фотоника (инженерная секция)
- Сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика
- Квантовая оптика и коммуникации
- Лазерная и силовая оптика
- Оптические материалы фотоники
- Артфотоника
- Биофотоника
- Оптическая метрология
- Физика наноструктур



Срок подачи тезисов:
1 июня 2023 года

Подробности и регистрация: nevphoton.ru