

# Зачем нужны квантовые вычисления?

## Часть 2. Основные этапы развития квантовых компьютеров с вентиляльной обработкой

Виктор Алексеев (victor.alexeev@gmail.com)

Во второй части статьи рассматриваются основные этапы развития квантовых компьютеров с вентиляльной обработкой от формирования первых квантовых алгоритмов до современности. Проводится обзор различных существующих квантовых компьютеров.

В 1992 г. был окончательно сформулирован квантовый алгоритм, предложенный Дэвидом Дойчем совместно с Ричардом Йожой (Richard Jozsa), ставший одним из первых квантовых алгоритмов, основанных на явлении квантовой запутанности и принципе суперпозиции. Этот алгоритм, получивший название «Дойч–Джозса», в различных модификациях используется и в современных моделях QC [1].

На стартовом этапе развития технологии квантовых компьютеров (CQC) были разработаны образцы кубитов и доказана принципиальная возможность реализации квантовых вычислений.

Американский математик Питер Шор (Peter Shor) в 1994 году разработал уникальный полиномиальный алгоритм разложения больших чисел на множители для квантового компьютера. Позднее он продемонстрировал возможность проведения сложных вычислений с помощью квантового компьютера при наличии слабой декогеренции и использования квантовой алгоритмической коррекции ошибок [2]. Теоретически алгоритм Шора для квантовых компьютеров может быть использован для взлома шифров. Однако, например, чтобы взломать протокол RSA-1024, нужно разложить на простые множители число  $2^{1024}$ . Мощному современному компьютеру, классическому КДЦ, потребуются сотни лет непрерывной работы, чтобы решить эту задачу с использованием существующих математических средств. Алгоритм Шора, который может быть использован для решения задач факторинга, обеспечивает экспоненциальное ускорение процесса разложения больших чисел на простые множители по сравнению с классическими алгоритмами бинарной логики. Тем не менее для взлома прото-

кола шифрования RSA-1024 в режиме реального времени понадобится универсальный квантовый программируемый вентиляльный квантовый компьютер с квантовой коррекцией ошибок вычислений, содержащий сотни тысяч кубитов. По оценкам специалистов, создание такого компьютера невозможно, по крайней мере, в ближайшее десятилетие [3].

В 1996 Лов Гровер (Lov Grover) предложил квантовый алгоритм, который сейчас известен как «алгоритм Гровера». Этот алгоритм позволяет квантовому компьютеру выполнять поиск в несортированной базе данных с гораздо большей скоростью, чем классический компьютер [4].

Теоретические работы Шора, Гровера, Дойча и многих других их последователей естественно вызвали взрывной интерес к тематике квантовых компьютеров.

Поскольку для компьютеров КДЦ подобные алгоритмы разложения были неизвестны, сообщения в серьёзных научных изданиях о том, что UDQGC может взломать любой код, стало явной сенсацией.

Таким образом, в конце 90-х значительно вырос интерес к проблеме квантовых компьютеров. К этому времени окончательно были сформулированы основные принципы работы цифрового квантового компьютера с вентиляльной обработкой «Universal Digital Gate Quantum Computer (UDGQC)».

Имеет смысл пояснить название UDGQC, которое отличает этот тип от всех других квантовых вычислителей:

- универсальный – способность адресовать и измерять состояние каждого кубита по отдельности, а также решать широкий круг прикладных задач;

- вентиляльный – управление кубитами реализуется с помощью набора универсальных вентилялей;
- цифровой – управление и программирование управляющих вентилялей осуществляется дискретно через внешний цифровой интерфейс;
- квантовый – в качестве информационных носителей используются квантовые биты – кубиты;
- компьютер – один из вариантов перевода на русский язык английского термина «computer», как наиболее близкий в философском плане понятию классического компьютера.

**Первый квантовый компьютер на основе ЯМР** с двумя кубитами в 1998 г. создали американские физики Исаак Чуанг (Isaac Chuang), Нил Гершенфельд (Neil Gershenfeld) и Марк Кубинец (Mark Kubinec). Работа первого квантового компьютера основывалась на эффекте ядерно-магнитного резонанса (NMR), при котором кубиты кодировались во внешнем магнитном поле. При этом логические операции совершались не над отдельными атомами и ионами, а над совокупностью всех молекул в водном растворе хлороформа ( $\text{CHCl}_3$ ) при комнатной температуре. Ориентированный с помощью внешнего поля спин изотопа углерода C-13 в молекуле хлороформа можно было интерпретировать как 1, а антипараллельный спин – как 0. Ядра водорода и углерод-13 можно было рассматривать вместе как 2-кубитную систему. В дополнение к внешнему магнитному полю применялись радиочастотные импульсы, заставлявшие спиновые состояния «переворачиваться», тем самым создавая наложенные параллельные и антипараллельные состояния. Кроме того, высокочастотное излучение было использовано для выполнения простого вычислительного алгоритма и проверки конечного состояния системы. Время когерентности кубитов этого первого компьютера составляло всего несколько наносекунд.

В 1997 году Давид Ди Винченцо (David P. DiVincenzo) сформулировал

концепцию универсального набора одно- и двухкубитных вентилях для квантовых вычислений с использованием спиновых состояний связанных одноэлектронных квантовых объектов [5]. Два года спустя Ди Винченцо опубликовал условия, необходимые для построения квантового компьютера [6].

В 1998 году объединённая исследовательская группа из Оксфордского, Массачусетского, Калифорнийского университетов и корпорации IBM продемонстрировали работу алгоритма Дойча–Джозы на 2-кубитном квантовом ЯМР – компьютере устройства [7].

Через год другая группа из Лос-Аламоса и Массачусетского технологического института создали 7-кубитный квантовый компьютер с аналогичной схемой ЯМР, но с использованием транс-изомера кротонной кислоты.

Использование растворов резко ограничивает масштабирование подобных устройств, количество взаимодействующих друг с другом молекул в рабочем объёме вещества может быть больше сотен миллиардов штук. Кроме того, очень короткое время жизни ЯМР-кубитов и резкое падение когерентности с возрастанием их числа сильно тормозили исследования в этой области. Поэтому большинство лабораторий отказались от применения схемы с ЯМР и перешли на кубиты другой природы, такие, например, как: сверхпроводники с джозефсоновским переходом, ионные ловушки, фотонные кубиты, кубиты на алмазных дефектах, кубиты на нейтральных атомах и другие [8, 9].

**Фотонные кубиты** были первыми из теоретически возможных вариантов кубитов, предложенными Ричардом Фейнманом. В основе идеи использования фотонов в качестве кубитов лежит классический опыт Юнга с дифракцией света, который в XX веке был обоснован с точки зрения суперпозиции фотонов [10].

Два крайних состояния фотона определяются его поляризацией, которая может быть вертикальной или горизонтальной либо круговой. Соответственно, их суперпозиция – это некоторое промежуточное состояние.

В линейных оптических квантовых компьютерах (Linear optical quantum computing – LOQC) для обработки квантовой информации используются линейные оптические элементы или

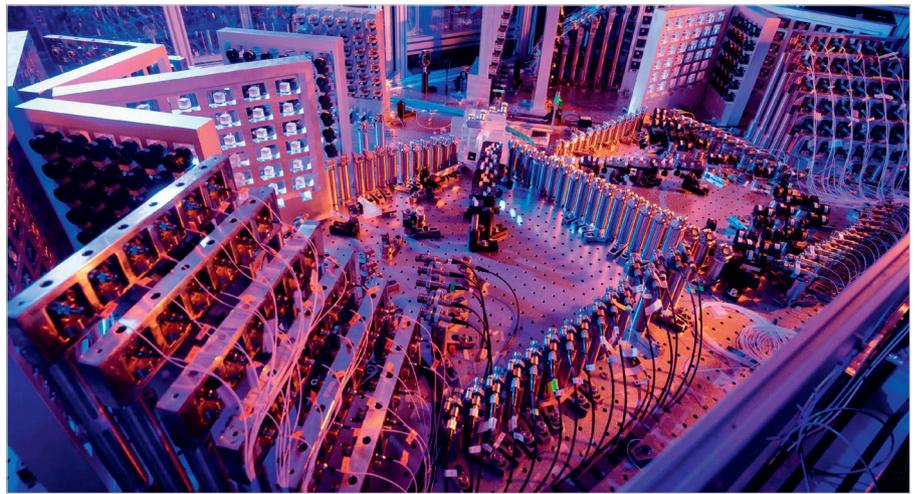


Рис. 1. Китайский Jiuzhang 2.0 считается одним из самых мощных фотонных квантовых компьютеров в мире

оптические инструменты (включая взаимные зеркала и волновые пластины) и детекторы фотонов и квантовая память, соответственно для обнаружения и хранения квантовой информации.

В современных фотонных (оптических) квантовых компьютерах применяется технология «rail-encoding». В этих квантовых чипах выгравированы два волновода, по которым может перемещаться фотон. При этом крайние состояния кубита определяются как фотон, находящийся в том или ином волноводе [11].

Линейные оптические квантовые компьютеры (Linear optical quantum computing – LOQC) крайне сложны в изготовлении, настройке и эксплуатации таких прецизионных элементов, как однофотонные зеркала и светоделители, фазовращатели и их комбинации, интерферометры Маха – Цендера с фазовыми сдвигами и т.д. Поэтому такие компьютеры эксплуатируются только в нескольких крупных мировых центрах. Например, китайский Jiuzhang 2.0 считается одним из самых мощных фотонных квантовых компьютеров в мире (рис. 1).

В 2021 году исследовательская группа, проводившая эксперименты на этом компьютере, заявила, что ими достигнуто так называемое «квантовое превосходство». По словам руководителя эксперимента: «Jiuzhang 2.0 может реализовать крупномасштабную выборку гауссовых бозонов (GBS) в один септиллион раз быстрее, чем самый быстрый из существующих в мире суперкомпьютеров КДЛ» [12].

Основным недостатком оптических квантовых компьютеров считается то, что современный уровень развития этой технологии не позволяет

решать сложные задачи, масштабирование системы потребует огромных дополнительных капиталовложений за счёт дорогостоящей оптики и элементов управления.

**Кубиты на базе сверхпроводящих материалов** получили в настоящее время наибольшее распространение [13].

В основном это произошло благодаря достаточно простой технологии изготовления, аналогичной той, которая используется при производстве современных микрочипов. Принцип действия таких кубитов основан на эффекте сверхпроводимости и эффектах в «джозефсоновских контактах». При криогенных температурах в сверхпроводниках образуется так называемый конденсат куперовских пар, состоящий из спаренных электронов и отделённый от остальных энергетических состояний энергетической щелью. При этом возникает неопределённость между количеством частиц на грануле сверхпроводника и разностью фаз волновой функции. Если замкнуть сверхпроводник в кольцо, то разность фаз будет обуславливать магнитный поток. Поскольку количество частиц и разность фаз не могут быть точно определены одновременно, то их крайние положения можно использовать в качестве основных состояний кубита, а текущее состояние – в качестве суперпозиции.

Большая часть таких кубитов построена по принципу колебательного контура, содержащего цепь из ёмкости и индуктивности. Основная идея в этой схеме заключается в использовании «джозефсоновских контактов». Эффект Джозефсона (Josephson junction) основан на протекании сверхпроводящего тока через тонкий слой изолятора, раз-

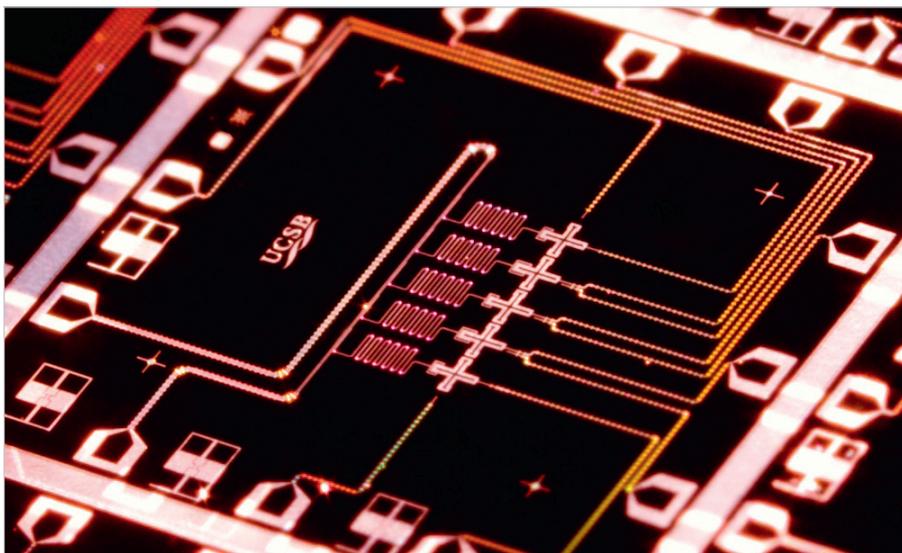


Рис. 2. Один из первых вариантов квантового процессора на базе крестообразных сверхпроводящих кубитов Xmon

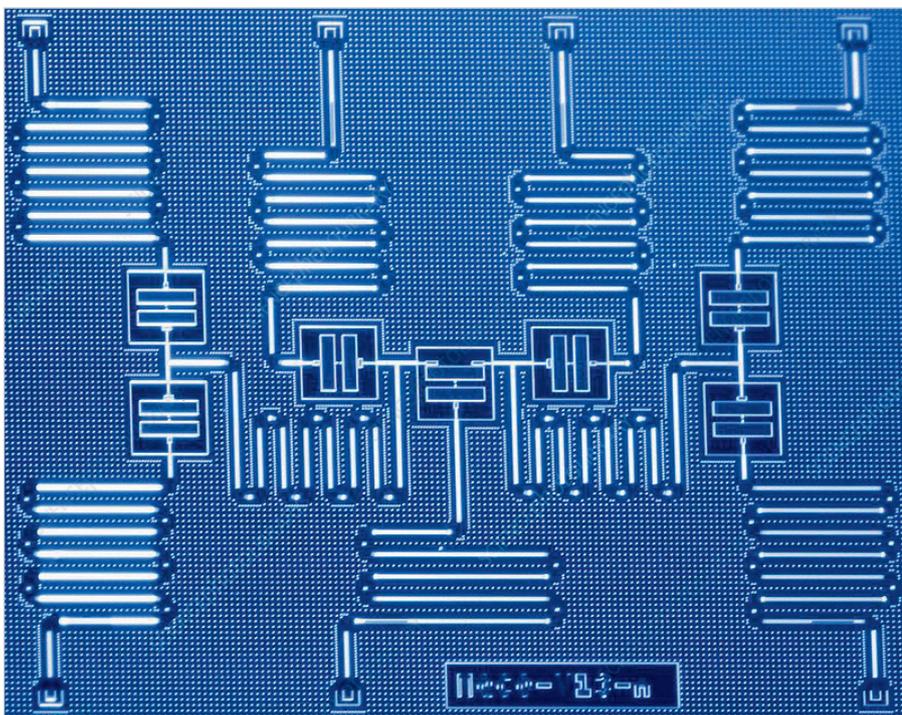


Рис. 3. Квантовый процессор IBM из 7 qubit

деляющий два сверхпроводника. Такой ток получил название «джозефсоновского тока», а само соединение сверхпроводников называется «джозефсоновским контактом».

Поскольку этот слой изолятора очень тонкий, пары электронов из одного сверхпроводника начинают туннелировать в другой сверхпроводник, и в данном случае туннелирование происходит для всего конденсата. Оказалось, что такая структура имеет нелинейную индуктивность, в результате чего мы можем использовать основное состояние и ближайшее к нему возбуждённое состояние.

Практически эти кубиты представляют собой микросхемы из сверхпроводника в несколько нанометров, обеспечивающими джозефсоновские переходы. Таким образом, токи сверхпроводимости, возникающие в такой конструкции, в зависимости от направления формируют два основных состояния кубита. Внешнее электромагнитное поле может переключать систему в одно из конечных состояний. Это очень общая и очень приближённая схема работы кубитов на базе сверхпроводников.

На практике реализуются различные варианты кубитов с эффектом

Джозефсона, которые определяются конкретными свойствами джозефсоновских переходов – ёмкостные или нелинейные индуктивности, разности фаз сверхпроводящих электронов и т.д. Такие структуры для кубитов формируются методами фотолитографии или электронной литографии, так же как формируются, например, транзисторы в полупроводниках.

В качестве примера на рис. 2 [14] показана конструкция одного из первых квантовых процессоров, в котором размещено пять сверхпроводящих кубитов Xmon в одном ряду. При этом каждый кубит связан со своим ближайшим соседом.

Кубиты, которые используются в проекте IBM Q, представляют собой высокочастотный сверхпроводящий трансмон – кубит (transmon qubit) с фиксированной частотой. Основное отличие трансмона от классического джозефсоновского зарядового кубита заключается в том, что у него энергия Джозефсона примерно в 100 раз больше энергии Кулона. Трансмон представляет собой одну из разновидностей зарядового кубита, работающего на принципе квантования заряда куперовских пар электронов в сверхпроводнике.

В трансмоне волны куперовских пар электронов, пройдя через два джозефсоновских перехода, вызывают явление интерференции. Амплитуда интерференционного тока зависит от внешнего магнитного поля, что позволяет в случае трансмона изменять его квантовые уровни энергии.

Квантовый процессор IBM состоит из «рабочих» трансмонов и «охраняющих» кубитов, объединённых между собой резонаторами и высокочастотными волноводами (рис. 3) [15].

В конструкции кубита используется так называемый «контейнер куперовских пар» (Cooper-pair box), который связан с большим резервуаром заряда через два джозефсоновских контакта, разделённых маленьким островком для накопления заряда. Система коррекции и управления внешними электромагнитными полями, в которых находится устройство, а также использование именно двух одинаковых джозефсоновских переходов, позволяет надёжно контролировать энергию этих переходов.

Измерение состояния кубитов и управление трансмонами осуществляется с помощью микроволновых резонаторов, которые также обеспечивают доступ к другим кубитам чипа.



**Рис. 4.** Внешний вид квантового процессора IBM, размещённого внутри криогенной установки «Oxford Triton dilution refrigerator»

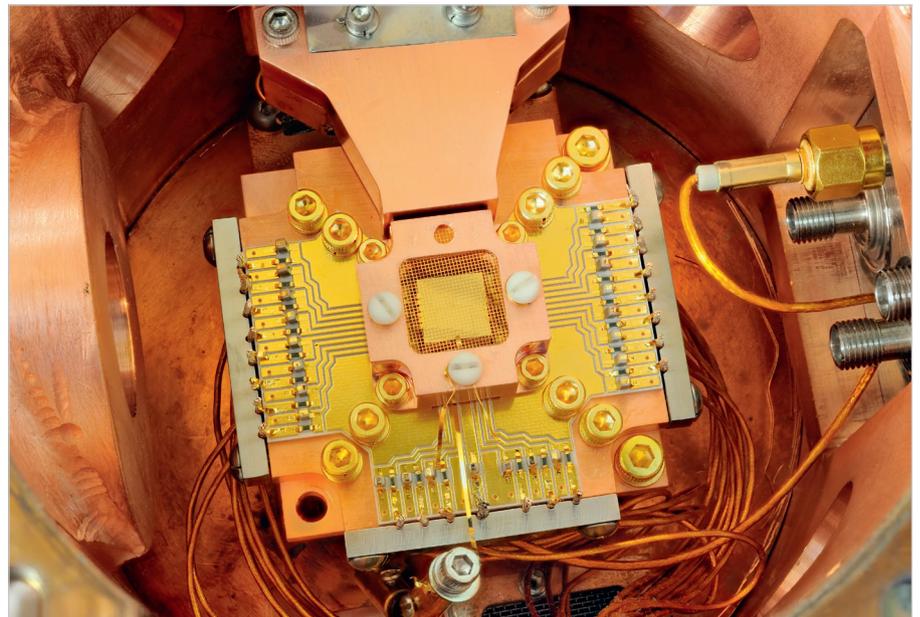
Достаточно подробно основы теории сверхпроводящих кубитов изложены в работе [16].

Сверхпроводящие кубиты работают только при температурах, близких к абсолютному нулю. Поэтому сами кубиты размещены в специальной холодильной машине (dilution refrigerator), внутри которой поддерживается температура, близкая к абсолютному нулю. Например, температура кубитов (Fridge Temperature) в процессоре IBM Austin (16) составляет всего 0,0143477 К.

Сама по себе установка для получения таких температур является произведением научно-технического творчества. В проекте IBM используется криогенное оборудование «Oxford Triton dilution refrigerator», в котором поддерживается непрерывная циркуляция смеси из жидких He-3/He-4 [17, 18] (рис. 4).

Кубиты на базе сверхпроводников с джозефсоновскими переходами используются в таких известных проектах квантовых компьютеров, как: Google, IBM, IMEC, BBN Technologies, Rigetti, Intel, а также в адиабатических квантовых вычислителях с отжигом D-Wave.

Квантовые компьютеры со сверхпроводящими кубитами имеют свои недостатки, ограничивающие их развитие на современном технологическом уровне. Основным недостатком заключается в том, что, будучи искусственными квантовыми системами, они не могут быть абсолютно одинаковыми. Поэтому уровень шума и вычислительных ошибок у этого типа систем



**Рис. 5.** Чип с ионной ловушкой в лабораторном квантовом компьютере NIST 2011

выше, чем у универсальных вентиляемых квантовых компьютеров с кубитами на естественно природных квантовых элементах.

**Кубиты с ионными ловушками** были предложены ещё в 1995 году. Однако реальные образцы компьютеров с ионными ловушками появились только в начале 2000-х [19].

В схеме с ионной ловушкой используются атомы с простой электронной структурой, например, кубиты с одним валентным электроном: Be<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup>, Sr<sup>+</sup>, Ba<sup>+</sup>, Zn<sup>+</sup>, Hg<sup>+</sup>, Cd<sup>+</sup> и Yb<sup>+</sup>. Сначала атомы ионизируются с помощью лазеров с определённой длиной волны излучения. Полученные ионы затем втягиваются в ионную ловушку, схема которой, как правило, является если не прямым аналогом ловушки Пауля, то её некоторой модификацией. В схеме ионной ловушки, изобретённой Вольфгангом Паулем в 1958 году, используется вращающееся электростатическое поле, модулированное радиочастотным сигналом [20].

В результате электростатические линии образуют фигуру, напоминающую нечто, похожее на седло для лошади. Заряженный ион попадает в нижнюю часть седла и удерживается там вращающимся полем. Воздействуя лазером определённой частоты, можно переводить ион в возбуждённое состояние, из которого он будет переходить на более низкие уровни, излучая фотоны. Современные технологии позволяют с высокой точностью регистрировать отдельные фотоны. В такой ловушке может быть размеще-

но несколько ионов. При этом можно подобрать параметры их состояния таким образом, чтобы они образовывали квантовую когерентную систему. Это очень грубая схема идеи кубитов на базе ионов в квантовой ловушке. В действительности ситуация намного сложнее, и для её описания необходимо привлекать математический аппарат квантовой механики. С более тщательным объяснением работы квантового компьютера на кубитах с захваченными ионами можно ознакомиться на сайте [21].

Этот сайт «PennyLane» предоставляет модуль qchem для моделирования простых примеров квантовой химии. Он содержит дифференцируемый решатель Хартри-Фока (Hartree-Fock) и предоставляет функциональные возможности для построения молекулярного гамильтониана, который можно использовать в качестве входных данных для некоторых квантовых алгоритмов

Одним из первых, принявших участие в разработках кубитов на основе ионных ловушек, был Национальный Институт Стандартов и Технологий США (National Institute of Standards and Technology (NIST) [22].

На рис. 5 [23] показан один из лабораторных вариантов кубита с ионной ловушкой, использованный в лабораторном квантовом компьютере NIST 2011. В этой конструкции два иона бериллия удерживаются электростатическим полем, модулированным радиочастотой, на расстоянии около 40 микрон друг от друга над квадратным золотым чипом в центре. Для пре-



**Рис. 6. Квантовый вычислительный блок на кубитах с ионными ловушками австрийской фирмы AQT**

дотвращения накопления статического заряда чип окружён медным экраном и золотой проволочной сеткой.

В следующем варианте лабораторного квантового компьютера NIST-2015 были задействованы два разных иона – один магния, а другой бериллия. При этом использование двух разных лазеров с разными длинами волн позволило отдельно управлять кубитами и каждым из вентилях CNOT и SWAP [24].

Такой подход в наши дни уже часто можно видеть в различных лабораторных установках с ионными квантовыми ловушками.

Например, в одной из последних публикаций 2021 года рассмотрены результаты испытаний квантового компьютера Массачусетского технологического института (MIT, USA), в котором кубиты изготовлены на базе пары ионов кальция и стронция. Управление кубитами осуществляется с помощью инфракрасного и видимого лазеров. Примечательно, что в этой паре ион стронция выполняет функцию кубита, а кальций выполняет функцию корректора ошибок [25].

Отмеченная методика позволяет использовать уникальные преимущества различных типов квантовых систем на одной платформе. Каждый вид ионов по-своему уникален. Поэтому некоторые из них лучше подходят, например, для хранения информации, другие больше приспособлены для коммуникации между кубитами, а третьи оптимальны с точки зрения специальных вентилях [26].

Направление квантовых компьютеров с ионными ловушками успешно развивается в наши дни. Лидером

в этой области сейчас является фирма Honeywell, квантовый компьютер которой имеет 128 кубитов с ионными ловушками [27].

Кроме крупных фирм направление ионных ловушек развивают и новые, молодые участники рынка. Например, австрийская фирма AQT из университета Инсбрука представила в 2021 году 20-кубитный квантовый компьютер с ионными ловушками. Основное достоинство, которое рекламируют авторы разработки, заключается в том, что их компьютер имеет минимальные размеры и размещён в двух 19-дюймовых стандартных приборных стойках (рис. 6) [28].

**Кубиты на базе нейтральных атомов** по числу публикаций за последние несколько лет постепенно выдвигаются на роль лидера [29–32].

Сама идея такого типа кубитов заимствована из принципа работы современных атомных часов, где используется резонансная частота возбуждения атомов цезия, размещённых в трёхмерных ячейках лазерных ловушек [33].

Кубиты на нейтральных атомах имеют некоторое общее сходство с ионными ловушками. Разница, как следует из названия, заключается в изначально нейтральном состоянии задействованных атомов. В современных технологиях с нейтральными атомами для захвата атомов и удержания их на месте используются оптические лазерные ловушки. Кубиты нейтрального атома хранят информацию в своих спиновых состояниях [34].

В системах с нейтральными атомами отдельные атомы можно запрограммировать, объединяя их в различные двух- или трёхмерные конфигурации [35].

Как правило, в этой технологии используются атомы из второй колонки периодической таблицы, например, стронций. В общем случае упрощённая схема работы кубита с нейтральными атомами выглядит следующим образом. Из расплава щелочного металла (стронция) отдельные атомы вытягиваются в вакуумную камеру. Через специальную оптическую систему эта камера подсвечивается системой перекрещивающихся лазерных лучей, образующих ловушки, в которые попадают атомы стронция. На всех пересечениях лазерных лучей, таким образом, образуется сетка из нейтральных атомов, которые служат кубитами в адресуемых местах. Захваченные атомы находятся на расстоянии несколь-

ких микрон друг от друга, что вполне достаточно для предотвращения взаимодействия ядерных спинов (состояний кубитов). С помощью другого набора лазеров атомы теряют свою энергию, затормаживаясь до почти неподвижного состояния.

На следующем этапе реализуется процесс запутывания кубитов с помощью накачки лазерами с определённой длиной волны.

При этом атомы щелочных металлов переходят в «ридберговское состояние», при котором внешний электрон находится в высоковозбуждённом состоянии, отдалённом от атома на большое расстояние. В этом виде атом ведёт себя скорее как ион, взаимодействуя с соседними атомами, но не позволяя им самим полностью перейти в ридберговские состояния. В этом варианте два соседних атома образуют суперпозицию, в которой оба частично находятся в ридберговском состоянии.

Примерно такая схема используется, например, фирмой Atom Computing, которая является одним из пионеров квантовых вычислений на нейтральном атоме [36].

В настоящее время Atom Computing использует в своём квантовом компьютере Phoenix систему на 100 кубитов [37].

Система работает при комнатных температурах. Поскольку система работает с лазерным охлаждением, то в этом методе не нужны сложные и громоздкие криогенные установки. Квантовый процессор на нейтральных атомах легко масштабируется. Для этого нужно просто использовать больше лазеров.

Аналогичная схема используется в Массачусетском технологическом институте (MIT), где разрабатывается компьютер на нейтральных атомах рубидия (рис. 7) [38]. Эта исследовательская группа показала, что квантовый логический вентиль, состоящий из двух нейтральных атомов, может работать с гораздо меньшим количеством ошибок по сравнению с другими типами кубитов [39].

Французские учёные из лаборатории Charles Fabry Laboratory недавно сообщили об успешных испытаниях трёхмерной конструкции из 72 нейтральных атомов. Используя голографические методы и быстрые программируемые лазерные пинцеты, им удалось создать трёхмерную структуру кубитов на нейтральных атомах.

Эти результаты продемонстрировали перспективность данного направления и возможность реализации систем из сотен индивидуально управляемых кубитов на нейтральных атомах, с использованием существующих в настоящее время технологий [40].

Однако у атомов щелочных металлов есть и свои недостатки. Например, электронные спиновые состояния, используемые для хранения квантовой информации, могут быть искажены световым полем лазеров, используемым для захвата атомов. Поэтому были разработаны кубиты на основе щелочноземельных атомов, которые могут более надёжно хранить информацию в своих ядерных спиновых состояниях.

В работе [41] была продемонстрирована возможность получения очень больших времён когерентности при использовании квантовой технологии с нейтральными атомами. В системе кубитов на базе стронция при кодировании двух ядерных спиновых состояний изотопа Sr-87 было достигнуто время когерентности, близкое к одной минуте. Результаты этих исследований показывают, что кубиты с ядерными спинами могут быть реализованы в

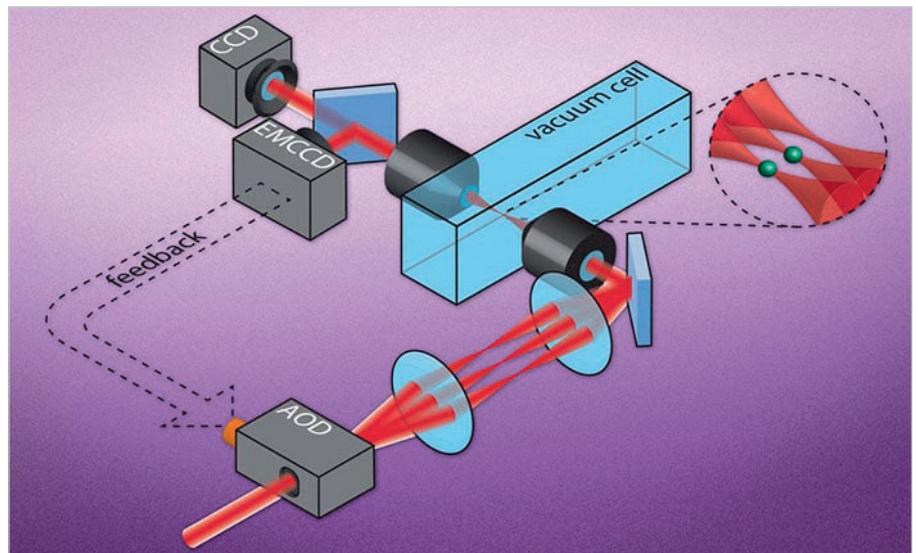


Рис. 7. Схема работы кубита на нейтральных атомах

системах с большими массивами захваченных нейтральных атомов и высокоточных операций запутывания. Однако выяснилось, что множественные спиновые состояния большого ядерного спина изотопа стронция-87 затрудняют его использование для реализации простого двухуровневого кубита.

Эти проблемы были преодолены при замене стронция на изотопы

иттербия-171 (Yb-171). Как и атомы стронция, спиновые состояния атомов Yb-171 устойчивы к возмущению оптической ловушкой. Но, в отличие от атомов Sr-87, атомы Yb-171 имеют ядерный спин 1/2, что упрощает манипулирование кубитами со спиновым состоянием на основе этого изотопа [42].

В целом кубиты с нейтральными атомами имеют ряд преимуществ по срав-



IF/RF & Microwave Design  
**advantex**  
WWW.ADVANTEX.RU

**РАЗРАБОТАНО  
И ПРОИЗВЕДЕНО  
В РОССИИ**



**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ  
СИНТЕЗАТОРЫ ЧАСТОТ**  
с непрерывным шагом до 21 ГГц  
и контрольно-измерительные приборы

ЭЛЕКТРОННЫЙ  
КАТАЛОГ



+7(495) 721-4774 • info@advantex.ru  
Москва, ул. Красноказарменная, д.13, стр. 1

Реклама

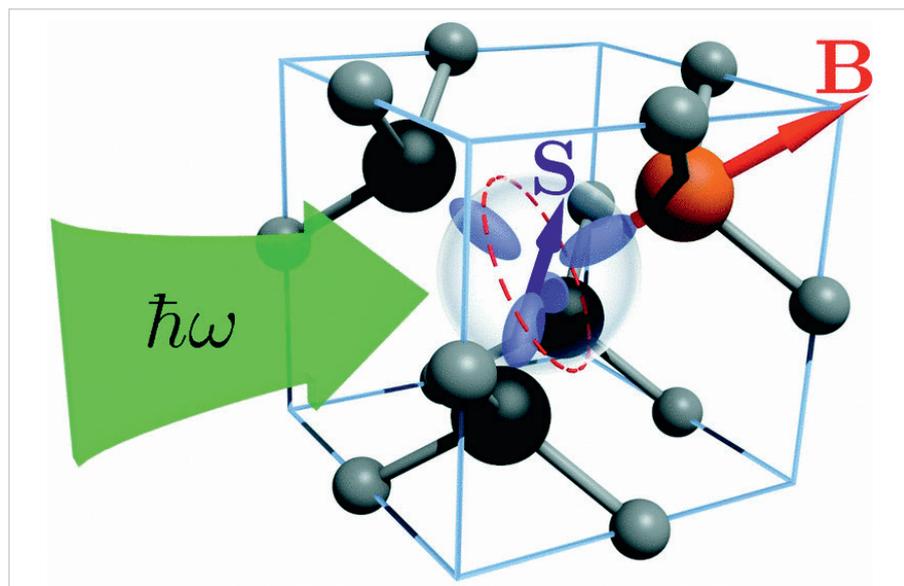


Рис. 8. Схематическое изображение NV-центра в алмазе с эквивалентными гибризированными связями

нению с кубитами на ионных ловушках. Так, сильное взаимодействие ионов между собой может вызывать паразитные шумовые эффекты. Поэтому для многокомпонентных систем необходимо использовать сложные конструкции ионных ловушек. Нейтральные атомы в основном электронном состоянии, напротив, слабо взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой, и поэтому предоставляют возможность компромисса между масштабированием, сложностью управления и декогерентностью.

Технология оптических ловушек на нейтральных атомах в принципе позволяет создавать очень быстрые квантовые вентили с использованием ридберговских состояний.

Кроме того, атомы щелочных и щёлочноземельных металлов легко охлаждаются лазером и могут быть закодированы в долгоживущих сверхтонких основных состояниях, что значительно увеличивает времена когерентности [43].

Кубиты на базе нейтральных атомов в настоящее время используют такие фирмы, как Ion Q, Alpine Quantum Technologies (AQT), Eleqtron, Quantinuum, CNRS and Université Paris-Saclay.

**Кубиты с искусственными атомами в твёрдом состоянии** «artificial atoms in the solid state» в последнее время всё больше привлекают внимание разработчиков систем квантовых вычислений. В настоящее время одним из самых популярных материалов для реализации кубитов на искусственных атомах является алмаз с азотными вакан-

сиями на NV-центрах (nitrogen vacancy centers) [44].

Другое, часто встречающееся в ранних работах, название этих кубитов – spin qubits – спиновые кубиты. Связано это с тем, что основным носителем информации в них служат электроны с определённым значением спина. Однако под этим же термином подразумеваются в ряде случаев полупроводниковые спиновые кубиты (semiconductor spin qubits), что, естественно, вызывает некоторую путаницу [45].

Дефекты в алмазах придают им особое свечение. Такие алмазы могут образовываться естественным образом в течение миллионов лет. Например, в природе может существовать алмаз, в решётке которого вместо атома углерода будет атом азота, который образовался в результате естественного процесса радиоактивного распада  $C-14 > N-14$ . Возможны и другие варианты образования цветных алмазов в природе. Такие алмазы крайне редки и безумно дороги. Поэтому исследуются и используются в лабораторных условиях искусственные алмазы с замещёнными атомами. В основном кубиты с дефектами кристаллической решётки получают способом ионного легирования [46]. В кубитах с дефектами в кристаллической решётке в основном используется так называемый чужеродный ион, который находится не на своём месте в кристалле.

Первые сообщения о необычных свойствах алмазов с вкраплениями атомов азота появились 46 лет назад [47].

Идея кубитов подобного типа основана на том, что атомы, являясь достаточ-

но простой с точки зрения квантовой механики системой, имеют ограниченные степени свободы, а оптические фотоны, испускаемые атомом при снятии возбуждения, представляют собой удобный зонд, точно соответствующий типичной энергетической шкале атомных переходов.

Технологический уровень экспериментальной физики только в 2010 году позволил учёным из Гарварда (Harvard University) на реальных опытах получить подтверждение эффекта запутанности между поляризацией одиночного оптического фотона с одиночным электронным спином центра азотной вакансии в алмазе. Результаты этой работы имели очень важное значение для дальнейшего развития данного направления. Они доказали возможность построения кубитов на когерентной паре фотонов, снимающих возбуждение, и спина электрона замещающего атома.

Эта пара – фотон и «искусственный атом» – стала своеобразным строительным блоком для твердотельных квантовых оптических сетей.

Схема работы кубита на базе NV-центра показана на рис. 8 [48].

На рис. 8 чёрный шарик соответствует атому углерода в решётке кристалла алмаза, а красный шарик символизирует замещающий атом азота. Длинная красная стрелка определяет ось NV (ось Z системы координат), где магнитное поле «В» приложено вдоль оси NV. Синий круг S со стрелочками схематически изображает парамагнитное триплетное состояние. Атом возбуждается внешним лазером ( $\hbar$ ). Благодаря механическим свойствам и практически ядерной среде без спина сама алмазная решётка является идеальным местом для такого искусственного атома.

Некоторые свойства NV-центра можно описать, рассматривая его как систему двух неспаренных электронов, обладающих тригональной симметрией (trigonal  $C_{3v}$  symmetry) [49]. Спиновая плотность в районе NV-центра фактически полностью локализована на трёх атомах углерода вблизи вакансии, в то время как на атоме азота она почти незначительна и исчезает на расстоянии, равном всего нескольким узлам решётки. Таким образом, атом азота, слабо связанный с кристаллической решёткой углерода, образует некую электронную вакансию. Это как бы «свободное» место заполняется

электроном, спином которого можно управлять с помощью магнитного поля.

В принципе возможны два варианта кубитов в такой системе. В одном случае можно использовать спин вращения ядра примесного атома азота. В другом случае в роли кубита выбирается спин электрона, вращающегося вокруг атома примеси. При этом электрон в NV-центре может находиться в суперпозиции двух спиновых состояний и выполнять роль кубита.

Структура кристаллов NV имеет почти идеальные для идентификации уровни возбуждённого состояния при криогенных температурах до 10 К. Энергетические уровни и связанные с ними оптические переходы при низких температурах позволяют эффективно связывать спины NV и оптические фотоны. Оптические переходы (~637 нм) на возбуждённые подуровни не изменяют спиновое состояние и могут использоваться для считывания состояния кубита.

При этом заданная спиновая поляризация может сохраняться до нескольких миллисекунд. Увеличение времени когерентности было достигнуто за счёт

удаления ядерных и электронных спинов, которые действуют как источники декогеренции. С этой целью использовался метод изотопного обогащения атомами углерода C-12.

Следует особо подчеркнуть, что большие времена когерентности были получены также в экспериментах при комнатной температуре [50].

Сочетание времени жизни когерентности, равное нескольким миллисекундам, с высокими скоростями спинового возбуждения, достигавшими 1 ГГц, позволяют проводить до 1 миллиона операций с одним кубитом за время когерентности. Эти характеристики выгодно отличают кубиты типа NV от других кубитов с «искусственными атомами».

Кроме алмазных кубитов используются также и дефекты в других кристаллах. Так, например, в работе [51] описаны кубиты, изготовленные с использованием тонких плёнок диоксида титана, легированных эрбием, выращенные на подложке из изолятора на кремниевой основе.

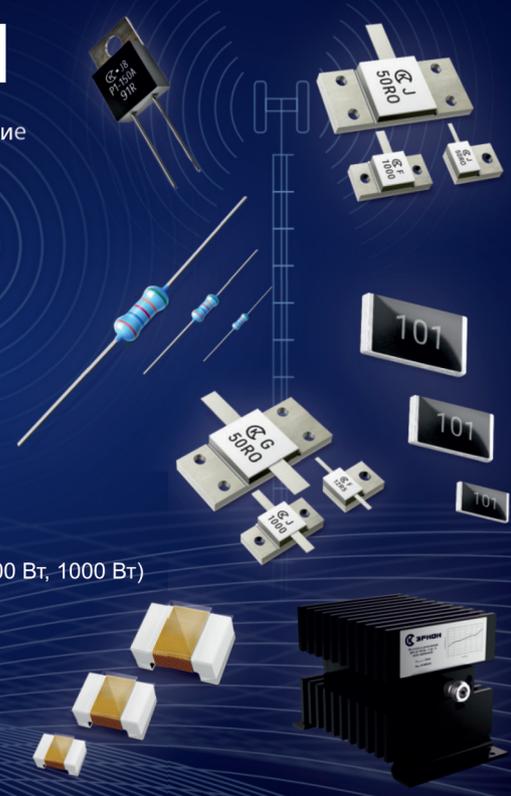
Одним из наиболее серьёзных недостатков схем кубитов с искусственными

атомами в дефектах кристаллической решётки является тот же самый момент «искусственности», который был отмечен выше для кубитов на сверхпроводящих элементах. Невозможно сделать два абсолютно одинаковых квантовых объекта, образовать из них безупречную когерентную пару и, мало того, запутать их с другими кубитами в вычислительной ячейке.

Оригинальное решение было предложено в работе [52], в которой рассмотрены процессы гетерогенной интеграции массивов алмазных волноводов, содержащих в своей структуре замещающие атомы германия. В экспериментальной установке была использована структура из 128 центров замещения кристаллической углеродной решётки атомами германия. Неоднородности отдельных оптических переходов центров замещения компенсировались с помощью интегрированной настройки на частоте более 50 гигагерц без ухудшения ширины линии. Вместо того чтобы связывать все кубиты в едином алмазном образце, авторы изготавливали множество отдельных модулей, а затем отобрали наиболее качествен-



**Акционерное общество**  
**ЭРКОН**  
Научно-производственное объединение



**ПРОИЗВОДСТВО, РАЗРАБОТКА И ПОСТАВКА ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ, АТТЕНЮАТОРОВ И ЧИП-ИНДУКТИВНОСТЕЙ**

- Современная производственная база.
- Высокое качество.
- Индивидуальный подход к потребителю.

**НОВИНКИ**

Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (50 Вт)  
 Атенюаторы ПР1-25 (50 Вт, 100 Вт, 150 Вт, 250 Вт, 300 Вт, 500 Вт, 1000 Вт)  
 ТПИ - тепловые чип-перемычки  
 СВЧ-резисторы Р1-160 (до 40 ГГц)  
 Мощные СВЧ-резисторы Р1-170 (до 1000 Вт)

603104, Г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6.  
 тел.: 8 (831) 202 - 24 - 34 (многоканальный)  
 8 (831) 202 - 25 - 52 (отдел продаж)  
 E-mail: info@erkon-nn.ru  
 www.erkon-nn.ru

ные элементы и связали их с помощью фотонной интегральной схемы. При этом удалось с требуемой точностью расположить модули в нужных местах схемы, соединив алмазные волноводы чипа с алюминий-нитридными волноводами на платформе.

Относительно простой и недорогой процесс изготовления таких кубитов является важным шагом на пути создания надёжной бюджетной квантовой памяти, предназначенной для масштабируемых квантовых компьютеров.

В Японии исследовательской группе из Университета Сага на Кюсю удалось реализовать новый метод, который позволяет производить алмазные пластины площадью около 13 квадратных сантиметров. В этом методе применяется сапфировая подложка с иридиевой плёнкой. Благодаря ступенчатой структуре сапфир позволяет выращивать алмазы при высоких температуре и давлении, избегая появления трещин при охлаждении и сводя к минимуму поглощение азота. Эти изделия уже получили свое название: «бриллианты Кензан – Kenzan Diamond».

Такие большие алмазные пластины можно будет использовать в производстве чипов для квантовых компьютеров [53].

Можно отметить, что сильно выраженная чувствительность кубитов на основе дефектов в кристаллической решётке, являясь недостатком в квантовых приложениях, одновременно служит преимуществом при изготовлении ультрамалых сенсоров.

В этой статье были рассмотрены только основные наиболее популярные типы кубитов. Направление исследования в области квантовых вычислений постоянно развивается. Рассмотреть все новые гипотезы и разработки в одной статье не представляется возможным. Например, руководитель проекта Четан Наяк из Microsoft недавно заявил, что компания достигла значительных успехов в разработках «топологических кубитов». В этих новых кубитах используется совершенно новый физический процесс, известный как легендарный нулевой узел Майораны (Majorana zero node). По словам Четан Наяка, учёным из Microsoft удалось создать топологическую сверхпроводящую фазу и сопутствующие ей майорановские нулевые моды [54].

Яркие сообщения появляются в связи с успехами в разработках совершенно нового типа кубитов, получивших название «кутрит», или «квантовый трит» (qutrit). Эта новая информационная единица квантовой физики может находиться в суперпозиции трёх взаимно ортогональных квантовых состояний [55].

Существует ещё много разных интересных проектов, таких, например, как логические кубиты со встроенной квантовой коррекцией ошибок в виде молекулярных наноманетиков; оптические считыватели в октаэдрических комплексах Ni (II) для приложений квантового зондирования; двухкубитное спинтронно-фотоэлектрохимическое производство водорода с использованием возбуждения поверхностного плазмонного резонанса; использование ареновых лигандов и другие экзотические разработки [56].

Возможно, к некоторым из этих проектов мы вернёмся в следующих статьях.

В заключение этой части статьи отметим, что в начале 2000-х, после того как постепенно стало приходить понимание того, что современный технологический уровень из-за шумов и декогерентности не позволяет в ближайшем обозримом будущем создать UDQGC, содержащий десятки тысяч кубитов, наступила «эпоха шумных квантовых компьютеров» (Noisy Intermediate-Scale Quantum era – NISQ).

Это значит, что мы находимся на ранних стадиях развития квантовых вычислений, и впереди ещё очень много непредсказуемых технологических и научных открытий. Высокий уровень шума – это то, что мешает современным квантовым компьютерам проводить те сложные вычисления, которые были задуманы при создании этих устройств. Слово «Intermediate-Scale – промежуточный» определяет переходный уровень, на котором были сформулированы цели и задачи, и переходит на новый этап поиска идей и технологий, необходимых для решения этих задач [57].

О квантовых вычислителях эпохи NISQ будет рассказано в следующей части статьи.

Для тех, кто заинтересовался вопросами квантовых вычислений и хотел бы изучить этот предмет более подробно, можно рекомендовать кембриджский курс лекций «Quantum Computation and Quantum Information», Michael A. Nielsen & Isaac L. Chuang [58].

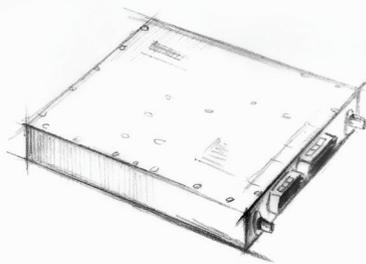
## Литература

1. URL: <https://thequantuminsider.com/2019/09/25/quantum-godfathers-1-david-deutsch-quantum-computings-lost-founder/>.
2. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/ixq/guide/shors-algorithm>.
3. URL: <https://arxiv.org/pdf/1312.2316.pdf>.
4. URL: <https://qiskit.org/textbook/ch-algorithms/grover.html>.
5. URL: <https://arxiv.org/abs/cond-mat/9701055>.
6. URL: [https://www.wikihero.net/en/DiVincenzo%27s\\_criteria](https://www.wikihero.net/en/DiVincenzo%27s_criteria).
7. URL: <https://journals.aps.org/prx/pdf/10.1103/PhysRevX.5.011038>.
8. URL: <https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/quantum-101/quantum-information-science-and-technology/what-qubit>.
9. URL: <https://www.newscientist.com/article/mg25133493-200-why-it-might-be-impossible-to-build-a-practical-quantum-computer/>.
10. URL: <https://22century.ru/popular-science-publications/quantum-superposition>.
11. URL: [https://www.researchgate.net/publication/253418427\\_Qubit\\_quantum\\_mechanics\\_with\\_correlated\\_photon\\_experiments](https://www.researchgate.net/publication/253418427_Qubit_quantum_mechanics_with_correlated_photon_experiments).
12. URL: <https://www.globaltimes.cn/page/202110/1237312.shtml>.
13. URL: <https://www.nature.com/articles/35017505>.
14. URL: <https://www.news.ucsb.edu/2014/014074/superconducting-qubit-array-points-way-quantum-computers>.
15. URL: <https://www.sciencemag.com/media/952763/view/ibm-quantum-computer-7-qubit-processor>.
16. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.06560>.
17. URL: <https://www.materialstoday.com/characterization/products/oxford-instruments-triton-cryofree/>.
18. URL: <https://newsroom.ibm.com/media-quantum-innovation?keywords=quantum&l=100>.
19. URL: [https://www.researchgate.net/publication/220435879\\_Recent\\_results\\_in\\_trapped-ion\\_quantum\\_computing\\_at\\_NIST](https://www.researchgate.net/publication/220435879_Recent_results_in_trapped-ion_quantum_computing_at_NIST).
20. URL: <http://iontrap.umd.edu/wp-content/uploads/2013/10/electromagnetic-traps-for-charged-and-neutral-particles-Paul.pdf>.
21. URL: [https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial\\_trapped\\_ions.html](https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_trapped_ions.html).
22. URL: <https://www.nist.gov/news-events/news/2015/12/nist-adds-quantum-computing-toolkit-mixed-atom-logic-operations>.
23. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Trapped\\_ion\\_quantum\\_computer#/media/File:Quantum\\_Computing\\_Ion\\_Trapping\\_\(5941055642\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Trapped_ion_quantum_computer#/media/File:Quantum_Computing_Ion_Trapping_(5941055642).jpg).

24. URL: <https://www.nist.gov/news-events/news/2015/12/nist-adds-quantum-computing-toolkit-mixed-atom-logic-operations>.
25. URL: <https://www.nature.com/articles/s41534-019-0218-z>.
26. URL: <https://arxiv.org/pdf/1602.02840.pdf>.
27. URL: <https://www.honeywell.com/us/en/news/2020/09/achieving-quantum-volume-128-on-the-honeywell-quantum-computer>.
28. URL: <https://www.aqt.eu/pine-system-19-rack-mounted-quantum-computer/>.
29. URL: [https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial\\_pasqal.html#:~:text=Ion%2Dtrap%20devices%20make%20use,number%20of%20protons%20and%20electrons](https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_pasqal.html#:~:text=Ion%2Dtrap%20devices%20make%20use,number%20of%20protons%20and%20electrons).
30. URL: <https://arxiv.org/pdf/2012.12281.pdf>.
31. URL: <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0003022>.
32. URL: <https://www.quantumcomputinginc.com/blog/the-many-faces-of-a-qubit/>.
33. URL: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/background-how-nist-f2-works#:~:text=A%20gas%20of%20cesium%20atoms,measurements%20of%20their%20natural%20vibrations>.
34. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35589685/>.
35. URL: <https://www.hpcwire.com/2022/01/25/quantum-watch-neutral-atoms-draw-growing-attention-as-promising-qubit-technology/>.
36. URL: <https://atom-computing.com/quantum-computing-technology/>.
37. URL: <https://www.servethehome.com/atom-computing-unveils-phoenix-quantum-computing/>.
38. URL: <https://www.science.org/content/article/arrays-atoms-emerge-dark-horse-candidate-power-quantum-computers>.
39. URL: <https://news.mit.edu/2017/scientists-demonstrate-one-largest-quantum-simulators-yet-51-atoms-1129>.
40. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30185955/>.
41. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35589685/>.
42. URL: <https://physics.aps.org/articles/pdf/10.1103/Physics.15.s55>.
43. URL: <http://info.phys.unm.edu/~ideutsch/Publications/0404055.pdf>.
44. URL: <https://link.springer.com/article/10.1557/mrs.2013.18>.
45. URL: <https://physicstoday.scitation.org/doi/full/10.1063/PT.3.4270>.
46. URL: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.jpcc.1c08679>.
47. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1976.0039>.
48. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-depiction-of-the-NV-center-in-diamond-with-equivalent-sp3-hybridized-dangling\\_fig8\\_226422854](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-depiction-of-the-NV-center-in-diamond-with-equivalent-sp3-hybridized-dangling_fig8_226422854).
49. URL: <https://link.springer.com/article/10.1557/mrs.2013.18>.
50. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-13495-6.pdf>.
51. URL: [https://www.researchgate.net/publication/360101132\\_Purcell\\_enhancement\\_of\\_erbium\\_ions\\_in\\_TiO\\_2\\_on\\_silicon\\_nanocavities](https://www.researchgate.net/publication/360101132_Purcell_enhancement_of_erbium_ions_in_TiO_2_on_silicon_nanocavities).
52. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/129652/1911.05265.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
53. URL: <https://www.techradar.com/news/these-ultra-pure-diamonds-could-be-the-key-to-unleashing-the-power-of-quantum-computing>.
54. URL: <https://www.techradar.com/news/microsoft-has-developed-a-whole-new-kind-of-qubit-to-accelerate-quantum-computing>.
55. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/qutrit-experiments-are-a-first-in-quantum-teleportation/>.
56. URL: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.jpcc.1c08679>.
57. URL: <https://www.technologyreview.com/2019/05/30/65724/how-a-quantum-computer-could-break-2048-bit-rsa-encryption-in-8-hours/>.
58. URL: <http://mmrc.amss.cas.cn/tlb/201702/W020170224608149940643.pdf>.

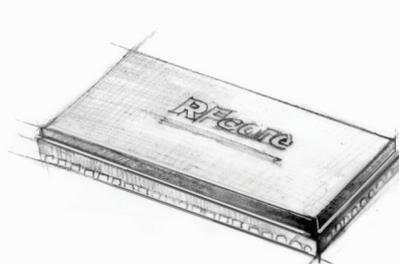


## НОВЫЕ МОЩНОСТИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



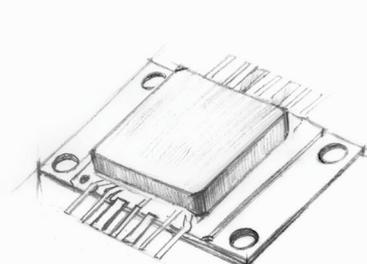
### СВЧ-усилители мощности

- Диапазон частот: от HF до Ku
- Выходная мощность: 2...1000 Вт
- Типовое усиление: 25...65 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 40 В



### Многофункциональные CMOS MMIC

- Диапазон частот: S, C, X, Ku
- Выходная мощность: до 15 Вт
- Исполнение: QFN-корпус



### GaN и GaAs MMIC

- Диапазон частот: 2...18 ГГц
- Выходная мощность: до 12 Вт
- Типовое усиление: 10...23 дБ
- Исполнение: QFN-корпус/кристалл



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА  
(495) 232-2522 ■ INFO@PROCHIP.RU ■ WWW.PROCHIP.RU

Реклама