



# КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: В ПОИСКАХ КОГЕРЕНТНОСТИ

## КВАНТОВЫЙ ЭКСПРЕСС УЖЕ В ПУТИ: ГЛОБАЛЬНЫЕ ИНВЕСТИЦИИ



**Илья Родионов,**  
директор НОЦ «Функциональные  
Микро/Наносистемы» (ФМНС)  
Московского государственного  
технического университета  
им. Н.Э. Баумана, кандидат  
технических наук, доцент



**Ольга Ефремова,**  
заместитель директора  
НОЦ ФМНС Московского  
государственного  
технического университета  
им. Н.Э. Баумана

Мир технологий находится на пороге эпохи глобальных преобразований, и квантовые вычисления становятся драйвером этой революции. Принимая во внимание невероятные возможности, которые может обеспечить вычислитель на новых физических принципах, правительства ведущих стран выносят развитие данного направления на фронт научной и технологической повестки, инвестируя в него значительные средства.

Лидером по объему вложений в квантовые технологии является Китай: порядка 15,3 млрд долл. в общей сложности. Второе место занимает Европейский союз: в формате различных квантовых консорциумов и объединений в «кванты» инвестировано 8,4 млрд долл. Третье место – за Сое-

По оценкам аналитического агентства McKinsey&Company, общий объем финансирования государственных программ по квантовым вычислениям в мире с 2015 по 2022 г. превысил 22 млрд долл.

диненными Штатами Америки, правительство которых потратило на отрасль более 3,7 млрд долл. Впрочем, относительное отставание США не должно вводить в заблуждение: мощнейшие потоки средств в квантовые технологии остаются неанонсированными. Более того, инвестиции в уникальные направления осуществляют крупнейшие бигтехи: IBM, Google, Amazon, Honeywell, что, в свою очередь, обеспечивает лидерство американских компаний в развитии той или иной технологической платформы (рис. 1).

Согласно аналитическим данным McKinsey&Company, крупный мировой бизнес в 2022 г. вложил в общей сложности 2,35 млрд долл. в стартапы в этой области, включая компании, занимающиеся квантовыми вычислениями, коммуникациями и сенсорикой. Подавляющая доля – 82% от общего объема средств – пришлось на разработчиков аппаратного и программного ПО (рис. 2).

Максимальные инвестиции со стороны мировых бигтехов получили разработчики сверхпроводниковых схем (2 млрд долл.). Инвестиции в стартапы относительно сопоставимы при лидерстве фотонной (1,491 млрд долл.), сверхпроводниковой (1,486 млрд долл.) и ионной платформ (порядка 1,454 млрд долл.).

### Драйвер нового технологического уклада

Идея квантовых вычислений была предложена независимо советским физиком Юрием Маниным и американским ученым Ричардом Фейнманом в начале 1980-х гг. С этого момента для создания практически полезного квантового компьютера мировыми группами проделана колоссальная работа. Почти 40 лет спустя в активе разработчиков появились уникальные технологии процессоров на различных физических платформах, с использованием которых уже было продемонстрировано квантовое превосходство на сверхпроводниковых процессорах Google Sycamore и Zuchongzhi (Китайская академия наук), а также фотонном Xanadu, код коррекции ошибок (Китайская академия наук, Google), разработка и тестирование квантовых алгоритмов и программного обеспечения для решения различных практических задач: от глубокого хеджирования для оценки рисков до расчета химических и физических свойств материалов и т.д. 2022 г. ознаменовался рядом значительных событий в индустрии квантовых вычислений:

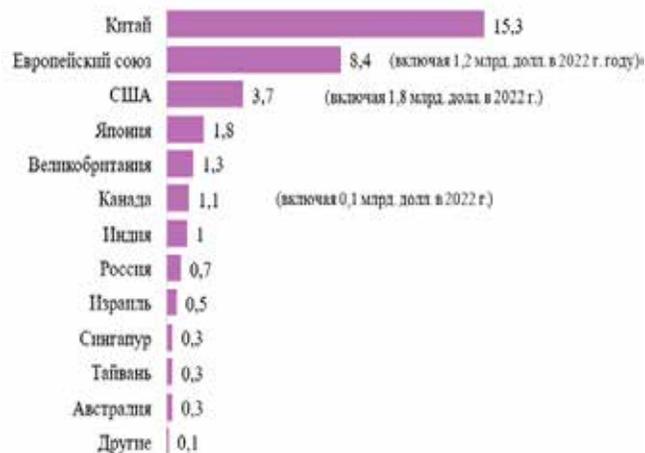


Рис. 1. Общий объем государственных инвестиций в квантовые технологии, млрд долл. (Quantum Technology Monitor 2022, McKinsey&Company)



Рис. 2. Рост частных инвестиций в квантовые технологии, млн долл.

- Нобелевская премия по физике 2022 г. присуждена ученым-исследователям квантовой перепутанности Алену Аспе, Джону Клаузеру и Антону Цайлингеру;
- IBM представила процессор Osprey из 433 кубитов и обновила собственную дорожную карту развития квантовых вычислений. Цель – создание процессора на 4000+ кубитов к 2025 г.;
- Xanadu (стартап из Канады) продемонстрировал квантовое превосходство при решении задачи выборки гауссовых бозонов (проблема выборки распределения вероятностей) на фотонном квантовом компьютере Borealis;
- Университет науки и технологий Китая и Google продемонстрировали код коррекции ошибок на сверхпроводниковых кубитах. Для решения задачи американцы использовали 49 физических кубитов;

- *Стремительное развитие системного и прикладного квантового ПО. Ряд крупных игроков – от дитех-гиганта IBM до стартапа QC Ware – предлагают уникальные решения для бизнес-партнеров с целью реализации исследований, которые невозможно или слишком дорого (и долго) проводить с помощью современных технологий.*

Именно на сверхпроводниковых процессорах Google и Университет науки и технологий Китая продемонстрировали код коррекции ошибок, а IBM – уникальной своей технологией сборки 127-кубитный Condor (433 кубита уже на очереди и очень скоро «оживут», несмотря на сомнения скептиков). При этом технологии IBM постепенно распространяются по миру: сегодня IBM Quantum Network включает более 60 организаций по всей Европе, пользующихся облачным доступом к квантовому оборудованию и ПО американского гиганта. Более того, IBM Q System 1 установлен в Институте Фраунгофера в Мюнхене и скоро появится в Токийском университете.

С учетом текущих темпов развития индустрии и потока инвестиций в ключевых разработчиков, в число отраслей экономики, которые уже в течение ближайшего десятилетия ощутят максимальные изменения, связанные с квантовыми вычислениями, входят автомобилестроение, химическая промышленность, финансовые услуги и биотехнологии. Прогнозируемый экспертами объем вложений в эти направления превысит 1,3 трл долл. к 2035 г.

## Как достигнуть квантового превосходства: сверхпроводниковые схемы

Сверхпроводниковые кубиты – одна из наиболее продвинутых и перспективных платформ реализации квантовых процессоров. Все ведущие мировые державы (США, Китай, Япония и др.) и хайтек-гиганты выбрали именно сверхпроводниковую элементную базу, вложив в ее развитие за последние 10 лет несколько миллиардов долларов.

Главными преимуществами сверхпроводниковых кубитов являются возможность их изготовления на базе технологических процессов, сходных с современными процессами микроэлектроники, а также

фактор использования классической управляющей электроники для их измерения и контроля, что существенно упрощает дальнейшее масштабирование сверхпроводниковых систем. Тем не менее сверхпроводниковые кубиты чрезвычайно чувствительны к дефектам в материалах и шумам различной природы, и это приводит к повышенным требованиям к техно-

логическим операциям их производства, точности и скорости управления и контроля, методикам измерения.

Для построения практически полезной квантовой вычислительной системы потребуются большое количество кубитов: от сотен до миллионов, по некоторым оценкам. Однако точность выполнения квантового алгоритма ограничена точностью двухкубитных логических операций, а с увеличением количества кубитов ошибка вычисления растет экспоненциально. При таких условиях квантовый процессор с боль-

шим количеством кубитов будет практически бесполезен. Таким образом, по мнению большинства ведущих мировых экспертов, для создания эффективных вычислительных систем необходимо в первую очередь обеспечить высокую точность двухкубитных квантовых операций, а затем уже масштабировать систему.

На данный момент в мире достигнут существенный прогресс в разработке сверхпроводниковых квантовых процессоров. Так, компанией Google в 2019 г. было продемонстрировано квантовое превосходство, а в 2022 г. реализован одномерный алгоритм коррекции ошибок на 54-кубитном процессоре Sycamore с точностью операций более 99%. Компания IBM предоставила облачный доступ к своему 127-кубитному процессору Eagle со средней точностью операций более 98%.

Квантовый бит (кубит) – элементарная единица информации в квантовых процессорах. В отличие от классического, он может находиться не только в состояниях 0 и 1, но и в их произвольной суперпозиции, что обуславливает экспоненциальный рост мощности вычислений с увеличением количества кубитов.

Основной характеристикой кубитов является время когерентности, в течение которого в искусственном атоме может храниться записанная информация.

В России с каждым годом наращиваются технологические компетенции в области квантовых вычислений. Платформа консолидации научного сообщества и индустрии, глубокий анализ мировых трендов и формирование фундамента развития данных технологий были обеспечены Фондом перспективных исследований (ФПИ). С 2013 по 2020 г. Фонд успешно реализовал передовые проекты в этой сфере на различных платформах.

Основы создания российских сверхпроводниковых квантовых процессоров были заложены проектом ФПИ, реализованным широким консорциумом исполнителей в 2016–2019 гг.

Квантовый процессор – система из кубитов, связанных между собой. Вычислительные алгоритмы, реализуемые квантовыми процессорами, состоят из однокубитных (1Q) и двухкубитных (2Q) логических операций, которые формируют необходимый и достаточный набор инструментов для построения алгоритмов практически любой сложности.

Вследствие неидеальности физических кубитов процесс выполнения логических операций обладает конечным уровнем точности, или «шумом».

В рамках проекта – благодаря разработкам объединенной команды под руководством ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – был совершен технологический прорыв: получена технология квантовых сверхпроводниковых интеграль-

ных схем, позволившая вывести качество российских кубитов на уровень ведущих мировых лабораторий, а также созданы первые образцы квантовых процессоров и симуляторов.

## ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Чип сверхпроводникового квантового процессора включает ряд микро- и наноразмерных элементов, для моделирования и изготовления которых требуются высокие компетенции команд теоретиков, технологов, инженеров и экспериментаторов (рис. 3).

Джозефсоновские переходы – самая миниатюрная, но и самая важная часть сверхпроводниковой квантовой схемы. Именно этот элемент привносит нелинейность в квантовый осциллятор и позволяет выделить два нижних энергетических уровня, которые используются для создания в кубитах логических уровней  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ . Конструктивно джозефсоновский переход представляет собой два сверхпроводящих электрода нанометровых масштабов, разделенных тонким слоем диэлектрика толщиной всего 0,5–3 нм. Чаще всего сверхпроводниковые схемы изготавливаются из сверхпроводящего алюминия – в таком случае «сэндвич» джозефсоновского перехода состоит из слоев Al-AlO<sub>x</sub>-Al.

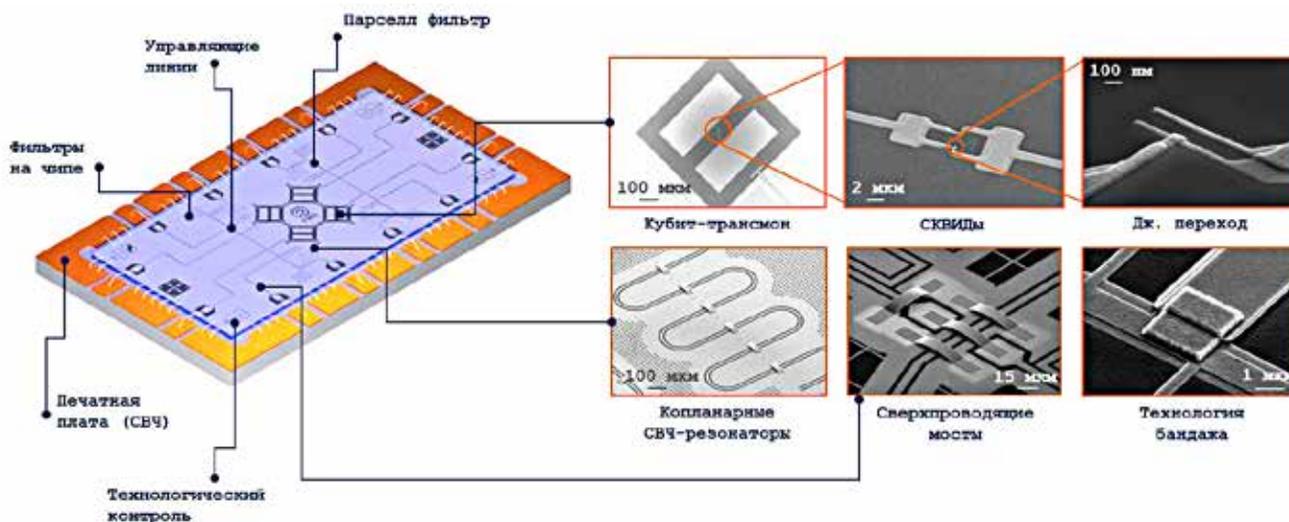


Рис. 3. Сверхпроводниковый процессор: модель и СЭМ-изображения элементов (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»)

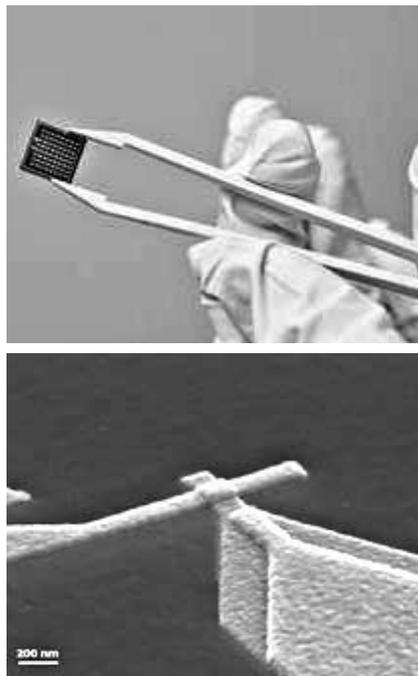


Рис. 4. Чип с массивом джозефсоновских переходов (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»)

Вследствие малых размеров джозефсоновского перехода и высоких требований, предъявляемых к точности воспроизведения размеров переходов и качеству электродов, отработка технологии изготовления является нетривиальной задачей. Командой ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» разработан серийный процесс, позволяющий создавать все существующие и перспективные типы сверхпроводниковых кубитов с джозефсоновскими переходами размером от 80 до 1000 нм и широким диапазоном значений критического тока от 7 нА до 8,5 мкА.

При этом воспроизводятся электрические и геометрические параметры джозефсоновских переходов с разбросом значений менее 5% по чипу, что соответствует лучшим мировым аналогам (рис. 4). Достигнутые диапазоны значений ключевых параметров позволили обеспечить гибкость проектирования



Рис. 5. Квантовый чип с высокодобротными СВЧ-резонаторами

многокубитных квантовых схем, а также возможность создания криогенных параметрических усилителей с квантовым уровнем шумов.

## Копланарные СВЧ-резонаторы

Взаимодействие между сверхпроводниковыми кубитами и схемой считывания информации обычно построено на базе сверхпроводниковых высокочастотных копланарных СВЧ-резонаторов с частотой 0,5–8 ГГц. Чтобы информация, записанная в кубите, не «утекла» в измерительную схему, применяют методику так называемого дисперсионного считывания. Его суть заключается в измерении частоты резонатора, которая зависит от состояния кубита ( $|0\rangle$  или  $|1\rangle$ ). Сдвиг частоты копланарного резонатора при изменении состояния кубита называется дисперсионным (рис. 5).

Ключевым параметром копланарных резонаторов для квантовых приложений является их добротность в однофотонном режиме, характеризующем в том числе и качество изготовления многокубитных квантовых сверхпроводниковых интегральных схем. Нашими специалистами разработана технология изготовления сверхпроводниковых микроволновых копланарных резонаторов с показателем более 4 млн, что превышает все опубликованные ранее значения. Для достижения столь высоких результатов используется собственная технология осаждения сверхпроводящего эпитаксиального SCULL-алюминия (патенты РФ и США) и серии специальных микротехнологий травления.

Стоит отметить, что универсальные квантовые вычисления и связь на больших расстояниях требуют многокубитной памяти, которая предназначена для хранения перепутанного квантового состояния нескольких кубитов и его возвращения по требованию.

Разработка квантовой памяти на основе сверхпроводниковых копланарных резонаторов во ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» ведется совместно с учеными из казанского университета КНИТУ КАИ. В результате совместных исследований создано устройство интегральной сверхпроводниковой квантовой памяти, которое позволяет сохранять одиночные фотоны с эффективностью  $60\pm 3\%$ , а 2–3 фотона – с эффективностью  $73\pm 3\%$ , что в 10 раз превышает известные результаты.

Однако предложенная схема может быть изменена для хранения по требованию, над чем сейчас активно работают ученые кооперации. Достигнутые результаты могут изменить

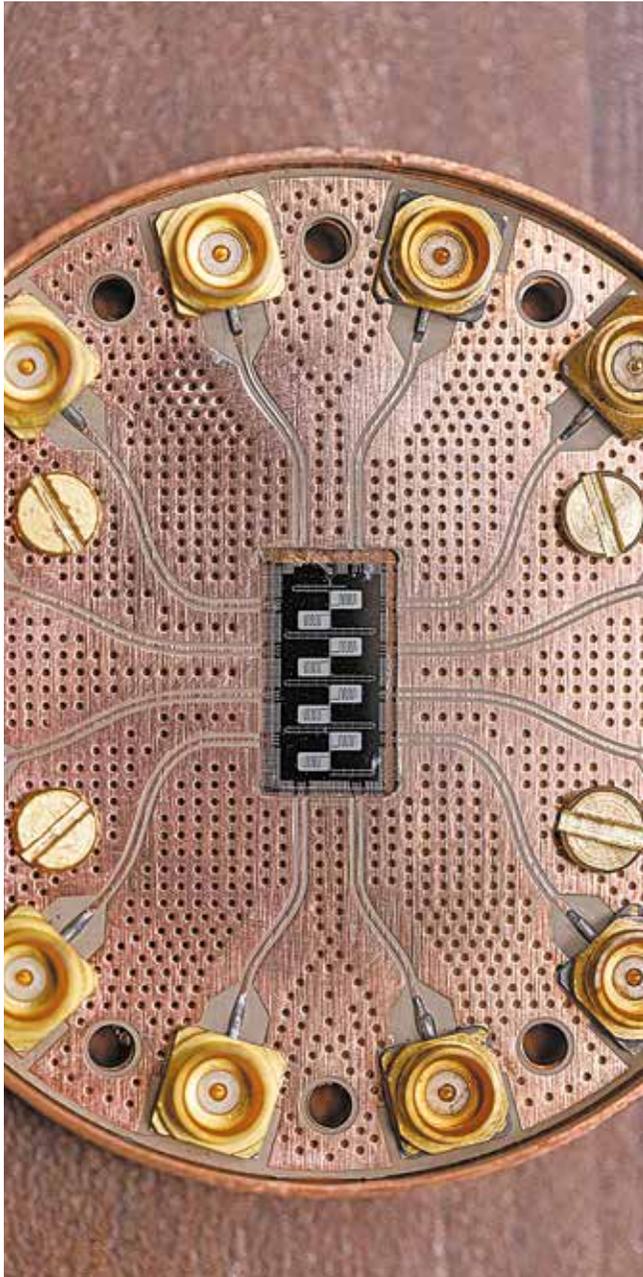


Рис. 6. Чип квантовой памяти в оснастке для проведения экспериментов (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»)

подходы к построению архитектуры практически полезных квантовых процессоров (рис. 6).

### **Криогенный параметрический усилитель**

Создать практически полезный квантовый компьютер невозможно без криогенных параметрических усилителей с квантовым уровнем шумов. Устройство позволяет увеличить соотношение «сигнал – шум» при измере-

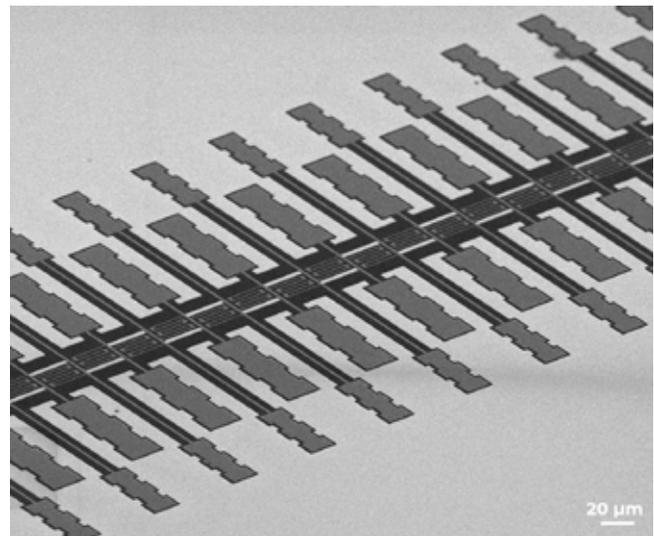
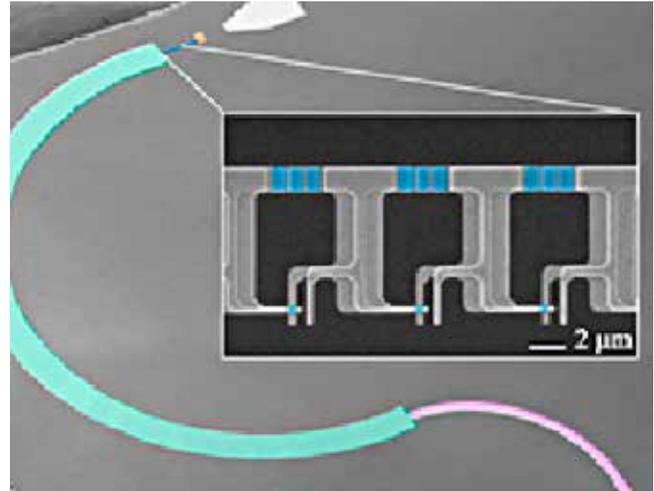


Рис. 7. Чип широкополосного квантового усилителя (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»)

ниях и повысить точность считывания состояния кубитов. Уникальность такого усилителя заключается в малом привносимом шуме в сигнал, получаемый от квантовой схемы. Основная сложность при его изготовлении – формирование массива джозефсоновских переходов, количество которых может достигать нескольких тысяч с одинаковыми характеристиками.

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» разработана технология и реализованы широкополосные джозефсоновские параметрические усилители, позволяющие, в отличие от узкополосных устройств, считывать сигналы с квантовой схемы, содержащей множество кубитов. Именно такой класс устройств сегодня используется ведущими мировыми группами, включая IBM, Google и др.

Рис. 8. Двухкубитный квантовый процессор для демонстрации квантового алгоритма Гровера (МИСиС, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»)

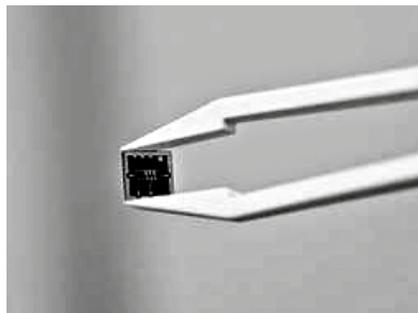


Рис. 9. Пятикубитный квантовый симулятор (МИСиС, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»)

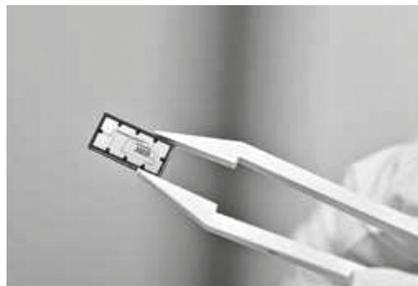
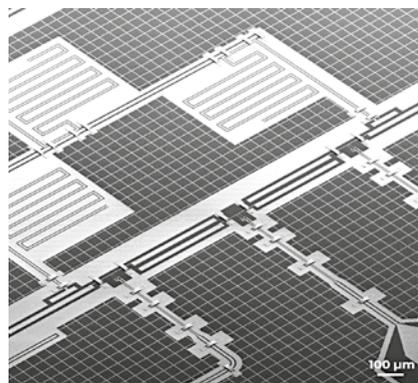


Рис. 10. Квантовая схема на базе трех кубитов-флакониумов (МИСиС, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»)



С помощью математического моделирования создана конструкция широкополосного усилителя, а также разработаны методики его калибровки. Проведены экспериментальные криогенные исследования, в рамках которых продемонстрирована ширина полосы усиления выше 600 МГц, усиление более 17 дБ и уровень шума, близкий к квантовому пределу (рис. 7).

## ИЗ ЧИСТОЙ КОМНАТЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОЛЕ: РОССИЙСКИЕ КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

Технологические успехи ФГУП «ВНИИА» в производстве отдельных элементов сверхпроводниковых квантовых процессоров и формирование экспериментальной базы

позволили российским командам создать ряд первых отечественных квантовых процессоров и, что важно, выполнить на них отдельные однокубитные и двухкубитные операции, а также квантовые алгоритмы. На базе разработанных технологий изготовлен первый российский двухкубитный квантовый процессор, на котором в 2019 г. был продемонстрирован полный набор квантовых логических операций и реализован квантовый алгоритм Гровера (решение задачи перебора) (рис. 8). С использованием этого процессора экспериментально показаны однокубитные и двухкубитные логические вентили с точностью операций от 80 до 99%.

Кроме того, активное развитие получили квантовые симуляторы на основе цепочек из 5, 11 и 25 кубитов для изучения фундаментальных явлений динамики коллективных состояний. Пятикубитный квантовый симулятор продемонстрировал эффективность для решения специфических физических задач, просчитав поведение фотонов в модели Бозе-Хаббарда быстрее 138-ядерного вычислительного кластера (рис. 9).

Флакониумы – один из прорывных типов сверхпроводниковых кубитов в мире, которые могут полностью вытеснить квантовую элементную базу (кубиты-трансоны), используемую сегодня технологическими лидерами (Google, IBM, Intel). Командой ФГУП «ВНИИА» совместно с МИСиС разработана технология производства сверхпроводниковых интегральных схем на базе кубитов-флакониумов, на которых впервые реализованы двухкубитные логические операции с рекордной точностью до 99,23% (рис. 10).

Сверхпроводниковые квантовые схемы заслуженно занимают одну из лидирующих позиций среди платформ для реализации вычислений нового поколения. Российское научное общество отстает от мировых лидеров в данном направлении, однако быстрое наращивание технологических компетенций позволяет делать оптимистичные прогнозы. Приоритетные задачи ближайших лет: повышение точности однокубитных и двухкубитных операций, масштабирование сверхпроводниковых квантовых схем, развитие аппаратного и программного обеспечения и организация облачного доступа к российским квантовым процессорам на различных платформах. 

