МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ФГБОУ ВО «КубГУ»)**

**Физико-технический факультет**

**Кафедра радиофизики и нанотехнологий**

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

**ОСОБЕННОСТИ В РАЗРАБОТКЕ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ**

Работу выполнила \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Бордонос Анастасия Алексеевна

Курс 3

Направление 03.03.03 Радиофизика

Научный руководитель

доцент, канд. физ-мат. наук, \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_А.А.Васильченко

Нормоконтролер

канд. физ.-мат. наук, доцент\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М.А.Жужа

Краснодар 2018

Реферат

Курсовой проект 27 с., 17 рис., 1 табл., 8 источников.

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ, СКАНИРУЮЩАЯ ЗОДНОВАЯ МИКРОСКОПИЯ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АСМ, НАНОЛИТОГРАФИЯ

Объектом исследования данного курсового проекта является сканирующий зондовый микроскоп высокого разрешения, принцип работы которого основан на взаимодействии иглы кантилевера (зонда) с поверхностью образца.

Целью проекта является изучение возможностей атомно-силовой микроскопии для создания наноразмерных устройств.

В результате выполнения курсового проекта получены знания о работе атомно-силового микроскопа, его характеристики и возможности его применения для создания и модификации наноразмерных устройств.

**Содержание**

|  |  |
| --- | --- |
| Обозначения и сокращения ………………………………………..………... | 4 |
| Введение …………………………………………………………….……….. | 5 |
| 1 Квантовые компьютеры…….……………………….…………………….. | 6 |
| 1.1 Принцип построения и работы квантовых компьютеров….….. | 6 |
| 1.1 Квантовые вычисления….….. | 6 |
| 2 Кубиты ……………………….…………………………….. | 10 |
| 2.1 Биты и кубиты……………………………….….. | 10 |
| 2.2 Измерения состояния кубитов……………………………….. | 10 |
| 2.3 Томография квантового состояния………………………..…….. | 11 |
| 3 Пути реализации квантовых компьютеров………… | 12 |
| 3.1 Тестовые объекты……………………………….……………………. | 12 |
| 3.2 Артефакты и методы их устранения………………………….…….. | 13 |
| 4 Шаги к созданию квантовых компьютеров……………………………… | 15 |
| Заключение . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .. | 26 |
| Список использованных источников . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . ….  | 27 |

**Обозначения и сокращения**

|  |  |
| --- | --- |
| АСМ | атомно-силовой микроскоп |
| AFM | от англ. – atomic-force microscope |
| СЗМ | сканирующая зондовая микроскопия |
| r | расстояние между двумя атомами |
| r0  | равновесное расстояние между атомами |
| U0 | значение энергии в минимуме. |
| Fz | сила взаимодействия зонда с образцом |
| Z | среднее расстояние между зондом и поверхностью |
| ОС | обратная связь |
| ЛАО | локальное анодное окисление |

Введение

Квантовый компьютер — вычислительное устройство, которое использует явления квантовой суперпозиции и квантовой запутанности для передачи и обработки данных. Полноценный универсальный квантовый компьютер является пока гипотетическим устройством, сама возможность построения которого связана с серьёзным развитием квантовой теории в области многих частиц и сложных экспериментов; разработки в данной области связаны с новейшими открытиями и достижениями современной физики. На настоящий момент были практически реализованы лишь единичные экспериментальные системы, исполняющие фиксированный алгоритм небольшой сложности.

Целью данного проекта являлся изучение особенностей в разработке квантовых компьютеров.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить литературу, посвященную принципам построения квантовых компьютеров;

- изучить что такое кубиты и их преимущество над битами;

- изучить, общие требования для реализации квантовых компьютеров.

**1 Квантовые компьютеры**

**1.1 Принцип построения и работы квантовых компьютеров**

Используя законы квантовой механики, можно создать принципиально новый тип вычислительных машин, которые позволят решать некоторые задачи, недоступные даже самым мощным современным суперкомпьютерам. Резко возрастет скорость многих сложных вычислений; сообщения, посланные по линиям квантовой связи, невозможно будет ни перехватить, ни скопировать. Сегодня уже созданы прототипы этих квантовых компьютеров будущего.

**1.2 Квантовые вычисления**

Классические (не квантовые) алгоритмы подразумевают конечную последовательность инструк- ций, или шаг за шагом выполняемые процедуры. Аналогичным образом, квантовые алгоритмы также подразумевают пошаговое выполнение процедур, выполняемых на квантовом компьютере. Все класси- ческие алгоритмы выполнимы также и на квантовом компьютере, однако термин квантовый алгоритм, как правило, используется для алгоритмов, учитывающих особенности квантовых вычислений (кван- товую суперпозицию, квантовую запутанность и т. д.). Все алгоритмы, реализуемые на квантовом компьютере, могут быть реализованы и на классическом компьютере, а все проблемы, неразрешимые с помощью классических компьютеров остаются неразрешимыми и c помощью квантовых компьюте- ров. Однако интерес к квантовым компьютерам оправдан тем, что некоторые алгоритмы (например, переборного типа) могут быть выполнены на них гораздо быстрее, чем на классических компьютерах. Наибольший интерес, в этой связи, вызывает класс BPP-алгоритмов, расширенный в настоящее время и на квантовые алгоритмы BPP ⊆ BQP (рис. 1).

Рис. 1 – Диаграмма включения классов сложности алгоритмов

В теории алгоритмов классом P (polynomial) называют «быстрые» алгоритмы решения задач, время работы которых поли- номинально зависит от размера входных данных. Класс P как наиболее узкий класс сложности может принадлежать также алгоритмам класса BPP (bounded-error, probabilistic, polynomial), дающим «быстрые» (за полиномиальное время) решения с вы- сокой вероятностью. Иерархия классов сложности алгоритмов: P — polynomial; BPP — bounded-error, probabilistic, polynomial; (BQP, QP, ZQP — класс квантовых алгоритмов); BQP — bounded-error quantum polynomial; QP — quantum polynomial-time; ZQP — zero-error quantum polynomial-time; P/Poly — non uniform polynomial-time; NP — nondeterministic polynomial; co-NP — complement of NP; PH — polynomial-time hierarchy; ZPP — zero-error probabilistic; PSPACE — polynomial-space; EXPTIME — exponential time (EXP); EXPSPACE — exponential space.

С. Смейл доказал, что с точки зрения сложности алгоритмов BPP + NP, это нечто похожее на P 6= NP [5]. Однако условия BPP накладывают меньше ограничений, чем условия P, что расширяет круг практического использования BQP-алгоритмов (нахождение периода, факторизация, дискретный логарифм и т. д.). В таких алгоритмах допускается производить те или иные вычисления в зависимо- сти от полученных результатов. Требуется, чтобы правильный ответ получался в «большинстве» слу- чаев. Выполняя параллельно множество вычислений, можно получить правильный результат с очень большой вероятностью. Так, например, в квантовом алгоритме факторизации Шора (алгоритм разложения числа на простые множители) количество опе- раций зависит от числа десятичных знаков и пропорционально квадрату разрядности числа [6], а в самом известном классическом алгоритме решета числового поля (general number field sieve) ко- личество шагов растет экспоненциально и быстро выходит за границы возможностей современных компьютеров (рис. 2).

Рис. 2– Сравнение алгоритмов факторизации

Например, будущие суперкомпьютеры эксафлопсной12 производительности позволят факторизо- вать 512-значное число приблизительно за 500 тысяч лет. Эту же факторизацию квантовый компью- тер, выполняющий 106 операций в секунду, выполнит приблизительно за 2.5 минуты. Такие возмож- ности квантовых компьютеров проявляются потому, что преобразования в квантовых вычислениях выполняются одновременно одной операцией. При этом квантовый компьютер, работающий с k куби- тами, может выполнить параллельно 2 k операций. Квантовые алгоритмы, как правило, быстро выдают все возможные результаты и правильные, и неправильные, а выбранный результат только с некоторой вероятностью является правильным. Для повышения вероятности правильного результата в кванто- вых алгоритмах специально увеличивается кратность операций, которые подбираются таким образом, чтобы неправильные результаты с большой вероятностью взаимно уничтожались, и вероятность пра- вильного результата увеличивалась. Квантовые алгоритмы выполняются с использованием квантовых схем, которые служат моделями квантовых вычислений, включающих последовательности квантовых вентилей (квантовых логических

элементов): это строительные элементы квантовых схем, являющиеся аналогами логических элемен- тов обычных цифровых схем классического компьютера, реализующих основные булевы функции (логический базис). Таким образом, квантовые схемы выполняют физические преобразования на ло- гическом базисе элементарных преобразований (квантовых гейтах, quantum gates). Так, например, на вход конкретной квантовой схемы может подаваться k кубитов, а результат её работы, одно- значно задаваемый значениями на базисных состояниях13, будет носить вероятностный характер и представляться матрицей 2 k × 2 k . Как известно, логические элементы классического компьютера не обратимы, то есть по значению на выходе, например, логического элемента «И» нельзя однозначно установить входные значения. Для обратимых логических элементов (теоретически они возможны и в классическом компьютере), какими и являются квантовые логические элементы, однозначно можно определить входные значения любой длины. На основе таких элементов создаются реверсивные кван- товые схемы, реализующие обратимые функции в пространстве k кубитов. На основе реверсивных схем могут быть созданы обратимые машины — узлы квантовых компьютеров. Создание реальных квантовых компьютеров (не имитаторов и не моделей)14 усложняет декогеренция15, проявляющаяся при физическом соединении таких узлов. Схема идеального16 квантового компьютера в самом общем виде представлена на рис. 3.

Рис. 5– Схема квантового компьютера.

Она может быть реализована k-кубитными регистрами17, представляющими собой квантовый про- цессор (аналог классического процессора), управляемый сигналами с обычного компьютера. Кроме того, в схему идеального квантового компьютера входит система измерения состояния кубитов, счи- тывающая результаты и замыкающая контур управления квантовым компьютером. Квантовый процес- сор, кроме основного, может включать дополнительные регистры, играющие вспомогательную роль. Состояния идеального квантового компьютера всегда когерентны и описываются разложением в 2 k

базисе |i1 ... iki, i1,...,ik = {0, 1}: |ψi = X i1,...,ik pi1,...,ik |i1,...,iki, (1) где: |ψi — суперпозиция состояний в 2 k -мерном векторном пространстве (волновая функция ψ в векторном виде), |i1 ... iki — 2 k базисных ортов этого пространства, pi1,...,ik — проекция вектора |ψi на направления ортов |i1 ... iki. Процесс вычисления на квантовом компьютере — это преобразование (1) одного вектора состояния |ψii в другое |ψi+1i путем умножения вектора |ψii на унитарную матрицу U размерности 2 k × 2 k : |ψi+1i = U(2k × 2 k )|ψii. (2) Обычно работа квантового компьютера, как и старт обычного компьютера, начинается с состояния инициализации. При этом состояние его кубитов |01 ... 0ki достигается охлаждением до сверхнизких температур или путем управления этим состоянием. Информация во входном квантовом регистре с помощью импульсных воздействий преобразуется в когерентную суперпозицию базисных ортого- нальных состояний |ψii. Далее эту информацию обрабатывает квантовый процессор в соответствии с алгоритмом решения задачи. Этот алгоритм реализует матрица преобразования U(2k × 2 k ), а ин- формация по решаемой задаче содержится в векторе |ψi+1i и получить ее можно путем измерения состояния кубитов, то есть определением вероятности нахождения кубита в квантовых состояниях, определяемых базисом. Таким образом, выше приведенное выражение (2) для |ψi+1i может слу- жить моделью вычислений на квантовом компьютере. Для этого нужно создать в квантовой среде кубиты, заставить её вычислять18 (обрабатывать информацию с использованием кубитов) в соот- ветствии с преобразованиями U|ψii, предварительно инициализировав, и далее измерить и выдать результат. Такая модель вычислений, реализованная в идеальном квантовом компьютере (рис. 3), является вероятностной аналого-цифровой. Аналоговая часть («аналоговый компьютер») — это соб- ственно квантовая среда (квантовый процессор, выполняющий унитарные преобразования) и измери- тель19 состояния кубитов. Цифровая часть — это классический управляющий компьютер, на котором пользователь получает результат вычислений. Такого сочетания аналоговых и цифровых частей с ве- роятностным представлением решения не имели ни классические аналоговые компьютеры прошлого, ни современные классические цифровые компьютеры. Эта модель квантовых вычислений выполняет преобразование начального вектора состояний кубитов |ψii = X x p i x |xi (3) в конечный вектор |ψi+1i = X x p i+1 x |xi, (4) через непрерывный ряд вероятностных состояний. Динамика преобразований (3), (4) — это передача во времени изменений аналоговых величин (амплитуд) px(t) в интервале 0 6 |px| 6 1. За это отвечает цифровая часть квантового компьютера, реализующая управление. Управление вычислительным процессом в k-кубитном квантовом компьютере связано с преобра- зованием 2 k компонент векторов |ψii → |ψi+1i в соответствии с матрицей преобразований U(2k ×2 k ). Даже на современном классическом суперкомпьютере трудно реализовать эти преобразования из-за очень большого количества операций, выполняемых при разложении матрицы U(2k × 2 k ) в упорядо- ченное множество произведений матриц [7]: U(2k × 2 k ) = Y i,j Ui(2 × 2) ⊗ Uj (22 × 2 2 ) (5)

В квантовом компьютере разложение (5) одновременно выполняется отдельным кубитом за счет кван- тового параллелизма, основанном на вычислениях суперпозиций базовых состояний. Это позволяет ему при интерпретации команд одновременно принимать несколько значений, находясь в состоянии квантового запутывания. Как данные в кубите могут содержать множество значений сразу, так и квантовый компьютер может выполнять множество интерпретированных команд одновременно. Од- нако квантовый параллелизм отличается от классических параллельных вычислений компьютера. Как правило, классический высокопроизводительный компьютер состоит из нескольких процессоров или вычислительных ядер. При этом, как правило, один процессор или ядро выполняют одну вычислитель- ную задачу. В случае квантового параллелизма один квантовый процессор выполняет сразу несколько задач. В выражении (5) каждая матрица Ui(2 × 2) описывает операцию на отдельном кубите, а мат- рица Uj (22 × 2 2 ) преобразует векторы состояний пар кубитов. Таким образом, число сомножителей в разложении (5) определяется числом однокубитовых и двухкубитовых операций, необходимых для реализации квантовых алгоритмов. Поэтому BQP алгоритмы относят к эффективным, так как общее число операций полиноминально от числа используемых кубитов в квантовом компьютере.

**2 Кубиты**

**2.1 Биты и кубиты**

Словам и "бит " и "кубит " обозначают как единицы классической и квантовой информации, так и классические и квантовые системы, являющиеся носителями 1 бита (кубита) информации. В современных классических компьютерах существуют биты памяти, хранящие информацию, и управляемые биты в "схемах", обрабатывающих информацию. В магнитной памяти ЭВМ битом является намагниченная область магнитной пленки: двум направлениям намагниченности соответствуют значения "0 " и "1 " бит информации. Переключение "0"—ил и "1"—>"0" требует преодоления энергетического барьера между двумя состояниями намагниченной пленки; именно наличие барьера обеспечивает надежность хранения информации. В оперативной памяти ЭВ М носителем информации является триггерная транзисторная схема. В описанных ячейках памяти состояния "0 " и "1 " разделены энергетическим барьером. Более того, состояния с минимальной энергией являются аттракторами, к которым система эволюционирует из множества состояний, окружающих аттрактор. Надежность хранения информации в классических компьютерах обеспечивается наличием энергетического барьера, который разделяет два аттрактора, представляющих состояния "0 м и "1" .

Базовым элементом квантового компьютера (носителем квантовой информации) является квантовый бит — кубит. В системах квантовой связи информация передается путем физического переноса кубита — носителя информации или методом телепортации квантового состояния кубита.

В качестве кубита может быть избрана любая квантовая система с двумя состояниями, характеризуемыми ортонормированными волновыми функциями \ср0) и \ф\).

Большой интерес вызывают реализации кубитов с использованием сверхпроводниковых структур. В зарядовом сверхпроводниковом кубите состояниям |0) и |1) соответствуют отсутствие и наличие заряда одной куперовской пары на металлической сверхпроводящей квантовой точке [12]. Состояниям |0) и |1) кубита в сквиде (сверхпроводниковое кольцо с переходами Джозефсона в магнитном поле) соответствуют сверхпроводниковые токи в противоположных направлениях

**2.3 Измерения состояния кубитов**

Измерение состояния кубитов в квантовом компьютер е считается одной из стандартных операций. Например , инициализаци я кубито в квантовог о регистр а може т быт ь выполнен а алгоритмически : каждый куби т в неизвестном состоянии регистра \ф) = ^2хах \х) подвер­ гается измерению в базисе |0), |1). Если получается |0), инициализация кубит а завершена; если получается |1), применяем операцию NOT | 1) = |0). Операция измерения выполняетс я в ходе процессов коррекции ошибо к (чтение синдрома ошибок) и возвращения в состояние |0) куби- тов-анцилл. Наконец, измерение всех кубитов кванто­ вого регистра в базисе |0), |1) выполняетс я по заверше­ нии вычислений в целях получения классической инфор­ маци и (двоичного числа j\,.. . ,jn — {0,1}) о решении задачи. С теоретической точки зрения нет никаких сложнос ­ тей в процедуре измерения состояния кубит а в базисе |0), |1). Однако физическая реализация измерения кубит а сопряжена с решением весьма сложных технологических проблем, связанных с преодолением трудностей измере­ ния состояния отдельной атомно й частицы: атома , иона, электрона , спина электрона или атомног о ядра , фотона . П о существу дл я каждой реализации кубит а нужна разработк а своего физического метод а измерения его состояния. Покажем, как это можн о выполнит ь дл я кубитов на оптических уровнях иона в ловушке [5]. В качестве состояния |0) кубит а выберем подуровень основного состояния 42 S\/2, в качестве состояния |1) — подуровень возбужденного метастабильног о состояния 3 2 Z) 5 /2 (см. рис. 3). "Опрос " иона о состоянии его кубит а можн о осуществить лазером с длиной волны À = 397 нм, возбуждающим дипольные переходы 42 S\/2 —> 4 2 Р 1 / 2 . ЕСЛИ Кубит был В СОСТОЯНИИ \0) — \42 S\/2), то под действием лазерного излучения он перейдет в состояние |2) = \42 Piß). Пр и возвращении кубит а в состояние |0) (спонтанный переход) произойде т излучение фотона , что и дае т информацию о том, что кубит в момен т начала измерения находилс я в состоянии |0). Если же до измерения ион был в состоянии 11) = |3 2Z ) 5 / 2 ), излучения фотона не будет. Из состояния 42 Р\/2 ион може т спон­ танно перейти на метастабильный уровень 3 2 ^з/2 - Чтобы не происходило "пленения" иона в этом состоянии, при измерении включаетс я еще один лазер на частоте пере­ хода 3 2D^/2 —> 4 2Р\/2 (Я = 866 нм), предотвращающи й пленение заселенности на уровне |3 2Z ) 3 / 2 ). Детектор спонтанно излученных фотоно в имее т малый угловой разме р (Q |2) (под дейст­ вием лазера с длиной волны À = 397 нм) и |2) —> |0) (спонтанный переход) излучается N фотонов , на детек­ торе зафиксируется в среднем n = rjN фотонов . Вероят­ ность того, что из N фотоно в ни один не будет зафик­ сирован детектором, равна pN(0)= (1 - rj)N = ехр (-п). П р и п = 10 вероятност ь PN(0) = 4,5 х 10~5 , т.е. при n ^> 1 вероятност ь ошибки при измерении мал а (состояние |0) принято за 11)). Если кубит в момен т начала измерения находится в состоянии суперпозиции |^) = а|0) + ß\ 1), то в измерении будет работат ь заселенность |а| состояния |0): N (х |а| . Заселенность \ß\2 состояния |1) пленена на метастабиль - н ом уровне и "не активна" . Отметим статистический характер измерения и необ­ ходимост ь удлинения времени измерения настолько, чтобы число детектированных фотоно в n — rjN стало статистически большим. К сожалению, это свойство (необходимост ь накопления сигнала) присуще большин­ ству разработанных методо в измерения состояния от­ дельных атомных частиц. В принципе желательно, чтобы длительност ь измере ­ ния был а сопоставимой с длительностью квантовых операций. Тогда измерение можн о был о бы использо­ ват ь как стандартный вычислительный прием. Пр и длительных измерениях (методы с накоплением сиг­ нала) должны приниматьс я меры дл я сохранения кван­ товой когерентности измеряемог о состояния. Не входя в детали, рассмотрим возможные методы измерения состояния кубитов на единичном спине / = 1/2. Активно разрабатываетс я теория метод а с использованием магнитно-резонансного силового микроскопа [28]. Магнитно е диполь-дипольное взаимо ­ действие одиночного спина с диполем ферромагнитног о зонда на конце механического резонатора-кантилевера используется дл я резонансного возбуждения колебаний кантилевера . Пр и воздействии на спин периодической достаточно длинной последовательности я-импульсов возбуждаютс я колебания кантилевера, детектируемые оптическими методами . Д л я спинов в твердом теле (спины 1—1/2 ядер фосфора 31 Р в бесспиновом монокристалл е кремния 2 8S i) предложены многостадийные методы измерения состояния ядерного спина: информация о состоянии ядерного спина передается спину S электрона атома 31 Р ; от спина S информация передается к заряду электрона е. Наличие (отсутствие) заряда одиночного электрона в окрестности нанотранзистор а детектируется измере­ нием тока через нанотранзисто р [29]. Хот я кажда я из перечисленных стадий измеритель ­ ной "эстафеты" выглядит осуществимой, все стадии вместе еще никем не были осуществлены. В ЯМР - квантовых компьютерах , в котора х используется тех­ ника импульсного магнитног о резонанс а на молекуляр­ ных жидкостях при комнатно й температуре , детектируе­ м ый сигнал образуется макроскопическим ансамблем (порядка 101 8 ) молекул. Оценки показывают , что в технике импульсного ЯМ Р на твердом теле при низких температурах (Т < 0,1 К) возможн о детектирование сигнала от ансамбл я порядк а 106 атомо в [30]. Измерения состояния кубитов на сверхпроводнико­ вых мезоструктурах (квантовые точки с куперовскими парами или сквиды со сверхтоками) сводятся к электри­ ческим измерениям с накоплением сигнала [31, 32]. Можн о утверждать , что проблема измерения состоя­ ния отдельных кубитов — одна из самых трудных с точки зрения физической реализации квантового компьютера .

**2.3 Томография квантового состояния**

Процедур а определения матрицы плотности р неизвест­ ного состояния системы называетс я томографией кван­ тового состояния [15]. Томографи я квантового состоя­ ния является существенным развитием идеи измерения состояни я системы в некоторо м базисе . Измерени е состояния \ф) = ^2хсх \х) в базисе \х) выполняетс я на единичном экземпляре системы. Результатом измерения с вероятностью | сх | будет некоторое базисное состояние \х). В единичном измерении вероятности \сх \ 2 остаютс я неизвестными. Томографи я состояния означает, что нужно опреде­ лит ь все элементы матрицы р или (в случае системы в чистом состоянии \ф) = J2X сх\х)) все амплитуды сх , включа я их фазы. Томографи я состояния есть статисти­ ческая процедура , требующа я наличия (изготовления) неограниченного ансамбл я частиц в состоянии р и выполнения измерений на частицах из этого ансамбля . Рассмотрим на примере кубита, какие измерения нужны.

Матриц у плотности р кубит а можн о разложит ь по стандартному набору матри ц операторо в преобразова ­ ния кубит а I, X, Y, Z: р = Tr (Ip)I + Tr (Хр)Х + Tr (Yp)Y + Tr (Zp)Z. (55) Величина Тг (Ар) представляе т собой среднее значение наблюдаемо й А. Из уравнения (55) следует, что дл я определения матрицы плотности р неизвестного состояния необхо­ димы статистические измерения, позволяющи е найти средние значения (моменты первого порядка ) наблюдае ­ м ых X, Y, Z: Найденные из измерений (приближенные) значения эле­ менто в матрицы р кубит а имеют вид P l l = l + (Z), Pl 2 = p\*1 = (X)-i(Y) , p 2 2 = l-(Z) . (57) Распределени е (X) и значени е среднеквадратичных отклонений (X) вытекают из центральной предельной теоремы [15]. Очевидно обобщение процедуры томографи и кванто­ вого состояния на системы, состоящие из п кубитов (квантовый компьютер): р = 2~п T r (Ol ® • • • ® Оп р)(Ох .. . Оп), (58) Ое (i,x,Y,z) . Н а основе процедуры томографи и квантового состояния предложена процедура "томографии кванто­ вого процесса". Например , при работ е квантового ком­ пьютер а кубиты подвергаютс я процессам декогеренти­ зации, оператор Е которых неизвестен. Иде ю метод а томографи и квантового процесса продемонстрируем на примере одного кубита. Выберем d2 = 4 (d—2 — раз­ мерност ь пространств а состояний кубита) подансамбл я кубитов в базисных состояниях рх,..., р4: P i = l<Al)(

**3 Пути реализации квантовых компьютеров**

В рамка х данного обзор а нет возможности дат ь изложе ­ ние экспериментальных результато в по поиску путей реализации идеи квантовых компьютеров . Укажем в качестве экспериментальных рабо т монографи и [14, 30] и обзоры по отдельным направлениям поиска [5, 25, 44]. Здес ь же ограничимс я перечислением направлени й поиска с краткими комментариями . Мето д ядерного магнитног о резонанс а в жидкостях при комнатно й температуре да л возможност ь демон­ страции экспериментального выполнения основных квантовых алгоритмо в и методо в коррекции ошибо к с использованием до семи кубитов в ансамблевом кванто­ в ом компьютер е [25]. Однако после установления факта, что число кубитов в ЯМР-квантовом компьютер е в жидкостях при комнатно й температуре ограничено чис­ л о м порядк а 10, усилия по развитию этого направления, по-видимому, ослабли. Большо е число экспериментов по реализации кванто­ вых вычислительных операций выполнено на ионах в одномерном ионном кристалле в ловушке Паул я [5, 44]. Однако и в этом вариант е квантового компьютер а обнаружилис ь серьезные препятствия к увеличению числа кубитов (ионов в одномерном кристалле) из-за неустойчивости одномерног о ионного кристалла . Обна ­ руженные ограничения числа кубитов могу т быт ь пре­ одолены, если использоват ь ансамбл ь многих ловушек. В этом случае необходимо разработат ь методы быстрой (за время , сравнимое с временем квантовых операций) транспортировки ионов из одной ловушки в другую. Показан а принципиальна я выполнимост ь транспорти­ ровки ионов [69]. Сходна я с ионными кристаллами архитектура распо­ ложения кубитов може т быт ь реализована в полупро­ водниковых кристаллах бесспинового моноизотопног о кристалла кремния 28 S i , в котором атомы фосфора 31 Р (кубиты) расположены в линейной цепочке (модель Кейна [7]). Кубитом служит ядерный (/ = 1/2) или электронный (S = 1/2) спин атома фосфора 31 Р . Числ о кубитов, "изготовленных" в такой архитектуре, не огра­ ничено. Темп развития этого направления, признавае­ мог о всеми весьма перспективным, определяется темпом нанотехнологических разработок , необходимых дл я соз­ дания структур с необходимыми параметрами . Трудным вопросом в такой реализации квантового компьютер а является измерение состояния одиночного спинового кубита. Проблема измерения состояния кубит а облег­ чается, если прибегнуть, как это предложено нами, к ансамблевому варианту кубит а [30]. Иде т активна я экспериментальна я работ а по созда­ н ию кубитов на электронах в полупроводниковых кван­ товых точках [70, 71]. В качестве кубитовых исследуются орбитальные или спиновые состояния одиночного элект­ рона в квантовой точке. В этом методе число кубитов (квантовых точек с одиночным электроном) также не ограничено. Изготовлены и исследованы кубиты на сверхпровод­ никовых мезоструктурах [71]. Здесь созданы дв а ва­ риант а кубитов: в первом вариант е квантова я информа ­ ция кодируется числом сверхпроводящих пар в кванто­ вой точке, во втором — направлением сверхпроводящего тока в сквиде. Дл я изготовления структур кубитов используется имеющийс я арсенал технологических мето ­ дов микроэлектроники. Числ о изготавливаемых кубитов на "чипе" в принципе не ограничено. В данном направле ­ нии поиска путей реализации квантового компьютер а наблюдаетс я больша я активност ь экспериментаторов и постоянный прогресс. Большо е количество экспериментов по реализации квантовых операций выполнено на одиночных атома х в микрорезонатора х (cavity quantum electrodynamics). Модель ю квантовой системы выступае т двухуровневый атом-кубит , связанный с осциллятором-фотоном в одной из мо д колебаний резонатора . Изложение экспе­ риментальных рабо т имеется в монографии [14]. К 38 К.А. ВАЛИЕВ [УФН 2005 сожалению, в этом метод е не ясно, как можн о увеличить число кубитов. Возможно , этот мето д окажется полез­ н ым при разработк е способов транспортировки атомных и фотонных кубитов, а также при передаче квантовой информации от атомных кубитов к фотонным, и обратно (атом-фотонный квантовый интерфейс). Интересна возможност ь реализации квантовых опе­ раций с помощь ю линейных оптических элементов ("оптический квантовый компьютер" ) [72]. В этом метод е число оптических элементов возрастае т экспо­ ненциально с числом кубитов в компьютере . Экспери­ менты в этом направлении реализации квантового компьютера , по сути, сливаютс я с экспериментами в области квантовой оптики [73]. Перечисленные выше направления поиска путей реализации квантовых компьютеро в опираютс я на развитые с иными целями технологии (технологии построения стандарто в времени, микроэлектронные , квантово-оптические технологии). Выдвинуты также другие перспективные идеи, требующие , возможно , развития существенно новых технологий. Перечислим некоторые из них: 1) двумерный электронный кристалл в потенциаль ­ ной ловушке (яме) вблизи поверхности жидкого гелия [74] (физика этих кристаллов хорошо изучена, кубитами могу т служит ь спины одиночных электронов в кри­ сталле); 2) двумерна я решетка атомо в в оптической ловушке , образованной стоячей волной интерферирующих лазер­ ных пучков [75]; 3) анионы в двумерном электронном газе в полупро­ водниках в условиях дробног о квантового эффекта Холл а [66]; 4) квантовые клеточные автоматы в ферромагнитных (антиферромагнитных) структурах в кристаллах [76]. Успехи последних лет в экспериментах с бозе-эйн- штейновскими конденсатами предоставляют возмож­ ность поиска квантовых операций с использованием этих новых квантовых систем [77]. 10. Заключение 10.1. Квантовые компьютеры: мечта или реальность? Современный этап исследований в области квантовых компьютеро в и квантовых вычислений является этапом разработки фундаментальных проблем. Итогом этого этапа должен быт ь выбо р одного из путей реализации квантового компьютер а как главного. Вероятнее всего, придется создат ь несколько прототипо в квантовых ком­ пьютеро в по разны м технологиям , сравнит ь их и выбрат ь один дл я дальнейшего развития . Пок а же в отношении будущего квантовых компью­ теров существует широкий диапазон мнений — от предсказаний грядущей (неминуемо) квантовой техниче­ ской революции до пасмурного скептицизма. В концент­ рированном виде мнения "pro " и "contra " высказыва ­ лись, например, в дебатах участников конференции по квантовым вычислениям (июнь 2003 г.) [46]. Перечислим аргументы "contra" . 1. Квантовый компьюте р не нужен: нет задач, стоя­ щих того, чтобы делат ь и сделат ь квантовый компьютер . За истекшее время найдены тольк о два эффективных квантовых алгоритма (Шора и Гровера). Не стоит делат ь квантовый компьюте р тольк о ради того, чтобы взломат ь современную популярную криптосистему RSA: она сама уйдет в небытие ко времени создания квантового компьютера . 2. Квантовый компьюте р — аналогова я машин а специализированного типа, которую трудно реализо­ вать . 3. Природ а не избрал а квантовый мето д вычисле­ ний — в мозг е нет квантовых операций. М ы не воспроизводим аргументы "pro" , полагая , что весь наш обзо р служит аргументацией "pro" .

**4 Шаги к созданию квантовых компьютеров**

**Разработан принципиально новый тип кубита для квантового компьютера**

Международная группа ученых, состоящая из российских, британских и германских специалистов в области квантовых технологий, создала революционную технологию кубитов, основанную не на джозефсоновском переходе, представляющем собой разрыв в сверхпроводнике, а на сплошной сверхпроводящей нанопроволоке. О своей работе исследователи поделились в журнале Nature Physics.

В мире пока нет универсальных квантовых компьютеров, способных справляться с любыми задачами, однако разрабатываемые методы и принципы вычислений уже сейчас позволяют решать сверхсложные задачи. Например, с помощью кубитов моделируют химические соединения и материалы, воссоздают механизм процессов фотосинтеза.

На данный момент существует несколько типов кубитов, но у каждого из них имеется недостаток, который снижает эффективность их работы. Например, созданные кубиты, способные работать в оптическом диапазоне, сложно масштабировать, в отличие от кубитов на сверхпроводниках, работающих в радиодиапазоне и основанных на так называемых джозефсоновских переходах. Каждый такой переход представляет собой разрыв сверхпроводника, а точнее, слой диэлектрика, через который туннелируют электроны.

Новый тип кубита основан на эффекте квантового проскальзывания фазы – контролируемого периодического разрушения и восстановления сверхпроводимости в сверхтонкой (порядка 4 нм толщиной) нанопроволоке, которая в обычном состоянии имеет довольно большое сопротивление.

Алексей Устинов, являющийся соавтором новой работы, руководителем группы Российского квантового центра, заведующим лабораторией «Сверхпроводящие метаматериалы» НИТУ «МИСиС», а также профессором Института технологий Карлсруэ, отметил, что сейчас удалось создать новый тип сверхпроводящих устройств, во многом аналогичных СКВИДу (SQUID, Superconducting Quantum Interference Device — «сверхпроводящий квантовый интерферометр»).

СКВИД представляет собой сверхчувствительный магнитометр, основанный на джозефсоновских переходах и использующийся для измерения слабых магнитных полей. Однако интерференция в новом устройстве вызывается не магнитным полем, а электрическим, которое меняет электрический заряд на островке между двумя нанопроволоками. Эти нанопроволоки играют в устройстве роль джозефсоновских переходов, но при этом не требуют создания разрывов и могут быть изготовлены из одного слоя сверхпроводника.

Алексей Устинов отмечает: в данной работе удалось показать, что эта система может работать как зарядовый интерферометр.

«Если нанопроволоку разбить на два участка и сделать в центре утолщение, то, меняя затвором заряд на этом утолщении, можно фактически делать периодическую модуляцию процесса квантового туннелирования магнитных квантов через проволоку, что в этой работе и наблюдается», — прокомментировал ученый.

Это ключевой момент, доказывающий, что получен управляемый и когерентный эффект и что его можно применять для создания кубитов нового поколения. Также Устинов рассказал, что разработка обладает не меньшей функциональностью, чем предыдущие, но более проста в изготовлении. Новая технология может стать в основе принципа работы всего набора элементов сверхпроводящей электроники.

В разработку российского квантового компьютера вложат 900 миллионов рублей

Консорциум Внешэкономбанка, компании «ВЭБ Инновации», Фонда перспективных исследований (ФПИ), МГУ имени Ломоносова и АНО «Цифровая экономика» в ближайшие пять лет собирается вложить в проект сверхмощного квантового компьютера 900 миллионов рублей, — пишет газета «Известия» со ссылкой на руководителя направления информационных исследований ФПИ Сергея Гарбука.

Также Гарбук сообщил, что параллельно с разработкой будут создаваться и новые алгоритмы для решения конкретных задач.

«Без соответствующего математического обеспечения квантовый компьютер не будет иметь практической значимости. Создание квантовых алгоритмов позволит говорить о принципиально новом качестве решения таких задач большой вычислительной сложности, как моделирование интеллектуальных способностей человека, оптимальное распределение транспортных и логистических потоков, прогнозирование погоды и других», — цитируют «Известия» Гарбука.

Соглашение о создании в России 50-кубитного квантового компьютера Внешэкономбанк, Фонд перспективных исследований, «ВЭБ — инновации», МГУ и АНО «Цифровая экономика» подписали ещё 15 февраля на Российском инвестиционном форуме «Сочи-2018».

Согласно этому документу, стороны будут совместно реализовывать комплексный научно-технический проект по созданию многокубитного оптического квантового симулятора на основе фотонных чипов и нейтральных атомов, а также развивать необходимую научно-исследовательскую и технологическую инфраструктуру. В рамках сотрудничества предполагается проведение консультаций, рабочих встреч и других мероприятий, в ходе которых стороны будут совместно ставиться и решаться прикладные задачи в сфере квантовых технологий.

Заведующий лабораторией искусственных квантовых систем МФТИ Олег Астафьев заявил, что рабочую систему из 50 кубитов можно создать за пять лет, так как эта область знаний очень динамично развивается. Реализация проекта позволит значительно ускорить вычисления и решить задачи, которые слишком сложны для современных суперкомпьютеров.

**Google представила свой новый квантовый процессор Bristlecone**

Сотрудники Google Quantum AI Lab не покладая рук трудятся над созданием квантового компьютера, который однажды сможет разрешить важнейшие мировые проблемы и прийти на смену традиционным компьютерам, к которым все мы так привыкли. Наконец-то компании удалось совершить небольшой прорыв в данном направлении и создать компактный процессор Bristlecone, способный потягаться с современными кремниевыми решениями ключевых производителей CPU.

Одной из важнейших проблем современных квантовых компьютеров является высокий уровень ошибок, совершаемых в процессе вычислений. Именно эту задачу инженеры Google и стремятся решить максимально оперативно, тем самым приблизив точность квантовых вычислений к нашим реалиям и сделав подобное железо пригодным для массового использования. Процессор Bristlecone был продемонстрирован в рамках мероприятия American Physical Society, которое прошло в этот понедельник в Лос-Анджелесе.

«Мы твёрдо уверены в том, что квантовые компьютеры на основе процессора Bristlecone сумеют превзойти традиционные ПК во многих областях», — произнёс со сцены глава подразделения Google Research Джулиан Келли.

Основным преимуществом процессора Google перед другими квантовыми решениями является не только тот факт, что при своём компактном размере он содержит в себе 72 кубита, но ещё и использование в нём особой технологии коррекции квантовых ошибок. Предыдущий 9-кубитный процессор Google демонстрировал количество ошибок на уровне 1%. Даже несмотря на значительный прирост количества кубитов в новом процессоре, инженерам удалось сдержать уровень ошибок на той же отметке благодаря инновационному алгоритму корректировки квантовых вычислений.

В данный момент квантовые компьютеры используются очень небольшим количеством крупных компаний, которым они нужны для специфических задач вроде криптографии. Но аналитики исследовательской компании Communications Industry Researchers считают, что уже к 2023 году прибыль рынка квантовых вычислений составит впечатляющие 8 миллиардов долларов. Сегодня в квантовых компьютерах заинтересованы такие гиганты, как Samsung, Daimler, Honda, JP Morgan и другие. Наибольших результатов в данной области на сегодняшний день достигли инженеры IBM и Intel. Теперь к ним присоединилась и Google, руководство которой не желает оставаться в стороне от потенциально невероятно прибыльного для себя рынка.

**Intel разрабатывает спиновые кубиты, работающие при более высоких температурах**

Компания Intel продолжает активно инвестировать в новые технологии, и среди последних ее интересов — квантовые вычисления. Осенью прошлого года был представлен первый квантовый процессор на базе 17 кубитов, а на прошедшей выставке CES один из крупнейших производителей полупроводников продемонстрировал чип уже с 49 кубитами на борту.

Intel, как и многие другие, видит большой потенциал в квантовых компьютерах, однако технические проблемы, стоящие на пути реализации технологии, уменьшаются пока, к сожалению, не так активно, как хотелось бы. Например, рабочая температура того же представленного на выставке чипа составляет -273,2 градуса Цельсия. Поэтому инженеры сейчас заняты поиском более практичных решений.

Вместе с учеными из голландского Делфтского технического университета (QuTech) Intel проводит исследования с так называемыми спиновыми кубитами. Работа над ними ведется уже несколько лет и рассматривается весьма обещающей. Спиновые кубиты представляют собой электроны, встроенные в кремний и находящиеся не столько в состоянии «спин вниз» (двоичный 0) или «спин вверх» (двоичная 1), но и в промежуточном состоянии, так называемой суперпозиции. Последняя, в свою очередь, является основой всех основ квантовых компьютеров. Плюс спиновых кубитов заключается в том, что они не такие чувствительные к температурам, как сверхпроводящие кубиты, требующие условий, при которых они будут эффективно работать, близких к абсолютному нулю. В свою очередь, сложность систем охлаждения накладывает свой отпечаток на практичность всей системы – они не позволяют квантовым компьютерам одновременно использовать больше нескольких сотен или тысяч кубитов. Говорить о системах на базе миллионов кубитов вообще кажется пока гранью фантастики в таких условиях.

Спиновые кубиты могут работать при температуре 1 кельвин. Сверхпроводящие кубиты необходимо охлаждать до 20 милликельвинов, что в 50 раз холоднее и намного дороже. Кроме того, охлаждение в таком случае происходит не только кубитов, но еще и других компонентов квантового компьютера, находящихся за контуром охлаждения, что тоже не идеально. Спиновые кубиты позволяют перенести остальные компоненты ближе к кубитам, что снижает сложность системы.

Вторым преимуществом спиновых кубитов является возможность более плотной компоновки в условиях прежнего объема. Коммерческие системы, несомненно, найдут пользу от такого масштабирования.

Третьим преимуществом спиновых кубитов является их процесс производства, довольно близкий к классическим полупроводниковым транзисторам, благодаря чему многие компании, занимающиеся производством полупроводников, смогут гораздо быстрее адаптировать эту технологию.

На ближайшей конференции Advancement of Science Intel и QuTech собираются показать первый квантовый компьютер на базе двух спиновых кубитов. Как отмечают создатели, система способна выполнять простые алгоритмы. Для производства кубитов Intel использовала свои 300-миллиметровые подложки (как на изображении выше), полностью очищенные от каких-либо изотопов. Это только первое тестовое производство, но в ближайшие месяцы компания обещает нарастить объемы производства и довести его до нескольких подложек в неделю. Каждая такая подложка может содержать несколько тысяч массивов спиновых кубитов.

**Заключение**

Основные результаты курсового проекта состоят в следующем:

1. Изучена литература, посвященная возможностям атомно-силовой микроскопии и созданию наноразмерных устройств с помощью АСМ.
2. Изучены устройство атомно-силового микроскопа и способы сканирования с помощью него различных поверхностей, сложности в получении изображений, появления аппаратных эффектов (артефактов). Рассмотрены методы создания и модификации нанормазмерных устройств такие как: наногравировка, наночеканка, локальное анодное окисление, перьевая нанолитография, параллельный перенос рисунка, термонанолитография. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. Например, проблема быстрого износа и разрушение зонда при использовании наночеканки и наногравировки была решена созданием таких методов как: ЛАО, перьевая нанолитография, термонанолитография. Износ зонда в этих методах происходит медленнее. Низкая производимость при использовании перьевого метода была увеличена с помощью метода параллельного переноса рисунка. Большая скорость была достигнута с использованием «чернил», которые пишут только при нагреве зонда. Но при этом возникла проблема – невозможность включать и выключать поток «чернил», пока перо находится в контакте с поверхностью. Таким образом, выбор метода зависит от нужд при создании наноразмерных устройств.
3. Изучена возможность создания наноразмерных устройств при помощи методов АСМ. Например, нанопроводники, полупроводниковые наноструктуры с квантоворазмерными эффектами на основе двумерного электронного газа, запоминающие устройства с высокой плотностью записи информации, одноэлектронные транзисторы, квантовые точки. С помощью рассмотренных методов также может проводиться

**Список использованных источников**

1 К. А. Валиев, Квантовые компьютеры и квантовые вычисления, УФН, 2005, том 175, номер 1, 3–39

2 Соловьев В. М. Квантовые компьютеры и кван- товые алгоритмы. Ч. 1. Квантовые компьютеры // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Ме- ханика. Информатика. 2015. Т. 15, вып. 4. С. 462– 477.

3 Богданов Ю. И., Кокин А. А., Лукичёв В. Ф., Орликовский А. А., Семенихин И. А., Черняв- ский А. Ю. Квантовая механика и развитие ин- формационных технологий // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 1. С. 17–31.

4 Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежда и реальность. Ижевск. РХД. 2001 352с.

5 Нильсен М, Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. М. Мир. 2006 824 с.

6 Богданов Ю.И., Валиев К.А, Кокин А.А. Квантовые компьютеры: достижения, трудности реализации и перспективы. Микроэлектроника. 2011 Т.40. №4. С.243-255

7 Прескилл Дж. Квантовая информация и квантовые вычисления. Том.1. М.-Ижевск. РХД. 2008 464с.