

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра оптики и биофотоники

Волоконно-оптический квантовый компьютер
АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2223 группы

Направления 03.04.02 «Физика»

Института физики

Передумовой Екатерины Александровны

Научный руководитель

доцент, к. ф.-м. н.

должность, уч. степень, уч. звание



дата, подпись

Г.Г. Акчурин

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой оптики и биофотоники

профессор, д. ф.-м. н.

должность, уч. степень, уч. звание



дата, подпись

В. В. Тучин

инициалы, фамилия

Саратов 2024 год

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Квантовый компьютер	3
2 Реализации квантовых компьютеров	5
2.1 Квантовый компьютер на основе атомов рубидия	5
2.2 Квантовый компьютер на основе сверхпроводящих туннельных Джозефсоновских кубитов	6
2.3 Оптические квантовые компьютеры	6
3 Волоконно-оптический квантовый компьютер	9
3.1 Волоконно-оптический квантовый компьютер на $2N$ интерферометрах Маха- Цандлера	9
3.2 Волоконно-оптический квантовый компьютер на $2N$ интерферометрах Саньяка	10
3.3 Схемы волоконно-оптических квантовых компьютеров.	10
Заключение	12
Список использованной литературы	13

Введение

Квантовые компьютеры представляют собой новое поколение вычислительных устройств, которые используют принципы квантовой физики для выполнения вычислений. Они обладают потенциалом для решения сложных задач, которые не под силу классическим компьютерам.

1. Квантовый компьютер.

Кубит (от англ. «quantum bit») — это наименьшая единица информации в квантовом компьютере, которая может находиться в состоянии суперпозиции и интерференции. Кубиты представляют собой квантовые системы с двумя базовыми состояниями, которые могут быть интерпретированы как 0 и 1 классического бита. Однако, в отличие от классического бита, кубит может находиться в суперпозиции этих состояний, что позволяет ему выполнять параллельные вычисления и решать задачи, которые были бы невозможны на классических компьютерах.

Один из способов идентификации состояния кубита - Сфера Блоха. Это двумерная визуализация состояния кубита, которая используется для представления его в виде точки на сфере. Кубит может находиться в одном из двух основных состояний: $|0\rangle$ и $|1\rangle$, которые соответствуют двум полюсам сферы [4].

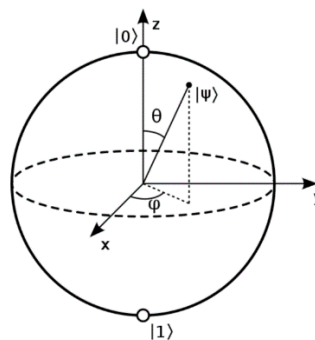


Рис. 1 Сфера Блоха состояний кубита.

Квантовый компьютер — это устройство, которое использует явления квантовой физики для выполнения вычислений. В отличие от традиционных компьютеров, которые используют двоичную систему (0 и 1), квантовые компьютеры используют квантовые биты или кубиты, которые могут находиться в состоянии суперпозиции и запутанности [6]. Это позволяет

квантовым компьютерам решать некоторые задачи гораздо быстрее, чем классическим компьютерам.

Схематически структура квантового компьютера представлена на рис.2 [7]



Рис.2 Квантовый компьютер, состоящий из n кубитов и позволяющий проводить одно- и двухкубитовые операции над любым из них или любой парой).

Квантовый компьютер состоит из нескольких основных компонентов:

1. Кубиты (квантовые биты)
2. Контроллеры кубитов
3. Квантовая шина данных
4. Система охлаждения
5. Детекторы ошибок
6. Программное обеспечение

2. Реализации квантовых компьютеров.

2.1 Квантовый компьютер на основе атомов рубидия.

Известно устройство квантового компьютера состоящее из N кубитов, представляющих собой атомы рубидия в газообразном состоянии, находящиеся в сверхвысоком вакууме в оптических пространственных ловушках, образующих двумерный пространственный массив, представляющий собой пространственную решетку из N оптических ловушек, созданных N сфокусированными гауссовыми пучками с помощью лазера, генерирующего на определенной длине волны и пространственного акустооптического модулятора, с помощью которого создается 2D оптическая решетка с пространственным периодом порядка нескольких микрон, представляющих квантовый регистр [14]. Квантовый процессор представляет собой тот же двумерный массив атомов, облучаемых через двухволновое зеркало другим лазером с резонансной длиной волны, переводящим одновременно каждый атом рубидия из N массива оптических ловушек в ридберговские возбужденные состояния, в которых N атомов решетки взаимодействуют между собой за счет кулоновских внутриатомных электростатических полей. Результат взаимодействия возбужденных атомов (кубитов) считывается при облучении этих же атомов микроволновым излучением, вызывающим флуоресценцию атомов из оптических ловушек и сигнал флуоресценции регистрируется с помощью управляемой видеокамеры и при этом сигнал пропорциональный интенсивности флуоресценции с двумерного массива оптических ловушек регистрируется цифровым компьютером [15]. Таким образом, квантовый регистр состоит из N атомов, в каждой оптической пространственной ловушке находится по одному атому в невозбужденном состоянии, обладающих квантовой запутанностью, суперпозицией и когерентностью. В квантовом процессоре в результате кулоновского взаимодействия атомов происходит процесс вычисления, при этом конечный результат считывается при резонансном микроволновом облучении ридберговских атомов (кубитов) в пространственном массиве оптических ловушек, вызывающих их флуоресценцию. Известно, что, учитывая спин ядра, электрон на внешней оболочке атома рубидия находится в основном сверхтонком долгоживущем состоянии. При сверхнизких температурах, при которых тепловая энергия kT много меньше сверхтонкого расщепления в основном состоянии атомов рубидия, два из которых рассматриваются как кубит, а ансамбль атомов, в таких состояниях представляет собой ансамбль невзаимодействующих кубитов или их инициализация.

Для удержания атомов в таких высоковозбужденных состояниях и требуются сверхнизкие температуры порядка микро-Кельвина. В настоящее время максимальный квантовый регистр содержит 51 атом рубидия в возбужденном состоянии в течение микросекунд. Сложная система резонансного радиочастотного считывания квантового состояния индивидуальных атомов в оптической ловушке в возбужденном состоянии предполагает технические трудности в управлении и реализации такого квантового процессора, особенно с ростом числа кубитов, кроме того для функционирования такого квантового компьютера требуется температура порядка мкК.

2.2 Квантовый компьютер на основе сверхпроводящих туннельных Джозефсоновских кубитов.

Сверхпроводящий кубит представляет собой микроструктуру из двух тонкопленочных металлических пластин, обычно из алюминия, разделенных диэлектрической нанопленкой из окиси алюминия, толщиной порядка 2 нм и представляющих туннельный наноконденсатор через который туннелирует куперовская пара электронов в условиях сверхпроводимости.

Основным преимуществом использования сверхпроводящих кубитов является относительно простой процесс изготовления с использованием стандартных методов электронно-лучевого напыления и нанолитографии, широко используемых при производстве полупроводниковой электроники. В основе работы сверхпроводящих кубитов лежит квантовый эффект Джозефсона [18].

Фирмой GOOGLE разработан квантовый компьютер на таких принципах с числом кубитов, достигающих 51. Основные проблемы связаны с охлаждением микрочипов до температуры милли-Кельвина, а при масштабировании числа кубитов возникают проблемы связанные с микроволновым считыванием состояния кубитов и взаимным влиянием этих СВЧ сигналов с ростом числа кубитов.

2.3 Оптические квантовые компьютеры

В своей статье Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng, «Quantum computational advantage using photons», Science, 2020 [19] проводят с 50 входными одномодовыми сжатыми состояниями фотонов, которые подаются в 100-модовый интерферометр. Оптические волокна стабилизированы по температуре, чтобы свести к минимуму медленный дрейф. Применяется пассивная фазовая стабилизация к интерферометру в виде прикрепления устройства к стеклянной пластине со сверхнизким коэффициентом расширения, температура которой стабилизируется в пределах 0,02°C.

Чтобы преодолеть ненужные колебания по всей длине пути фотонов, используют намотку оптического волокна длиной 5 метров на пьезоэлектрический цилиндр.

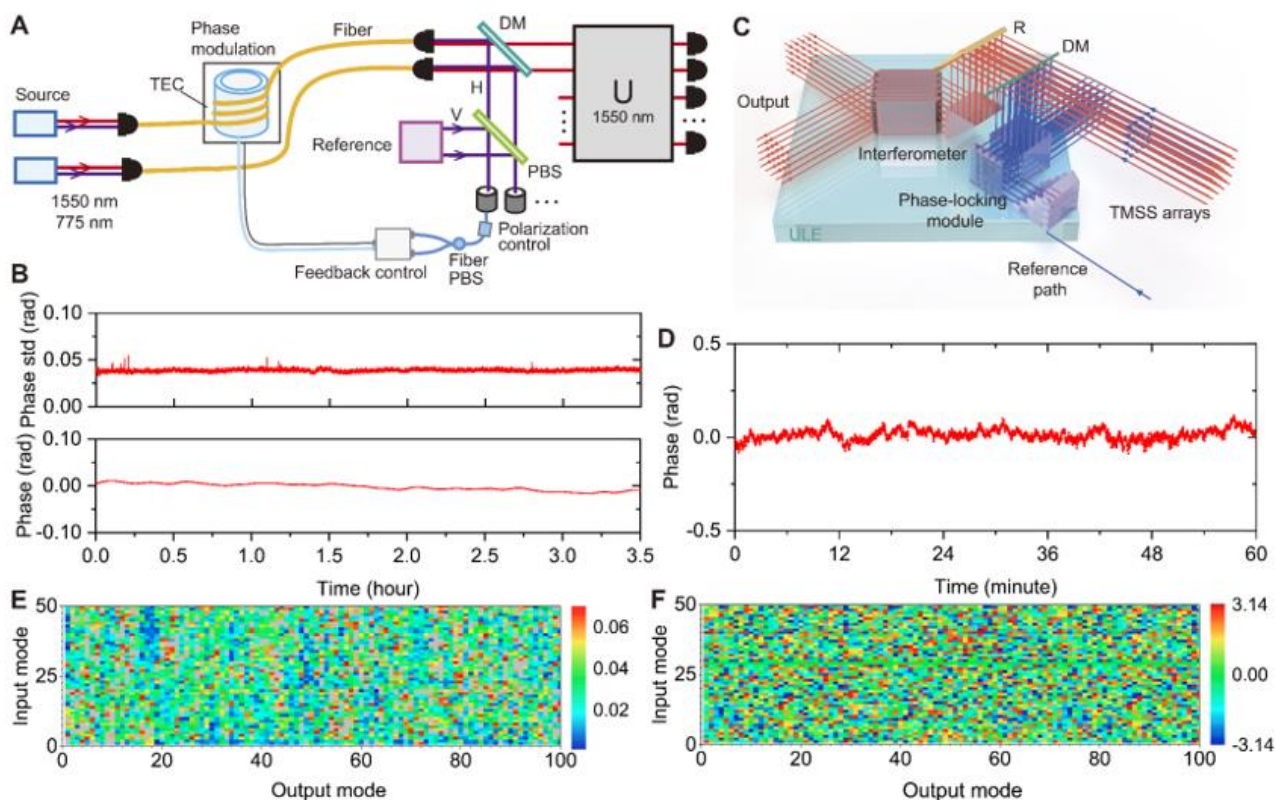


Рис.3 Предложенные пути снижения влияния механических и акустических шумов на стабильность функционирования оптического квантового процессора

Вместе с этим, в статье Han-SenZhong, Yu-HaoDeng, Jian-WeiPan, et.al. Phase-Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light. Physical Review, 2021 – APS [20] сообщают об экспериментах по разработке нового квантового источника света высокой яркости, который генерирует излучение сжатых фотонов, и одновременно обладает высокой чистотой и эффективностью. Спонтанно генерируемые пары фотонов, находящиеся в резонансе с лазером накачки, стимулируют параметрическое излучение второй пары фотонов в усиливающей среде. Двухпроходная схема может быть непосредственно расширена до более высоких порядков и генерировать более высокую яркость, что делает предложенный вариант сравнимым с оптимальным квантовым источником света.

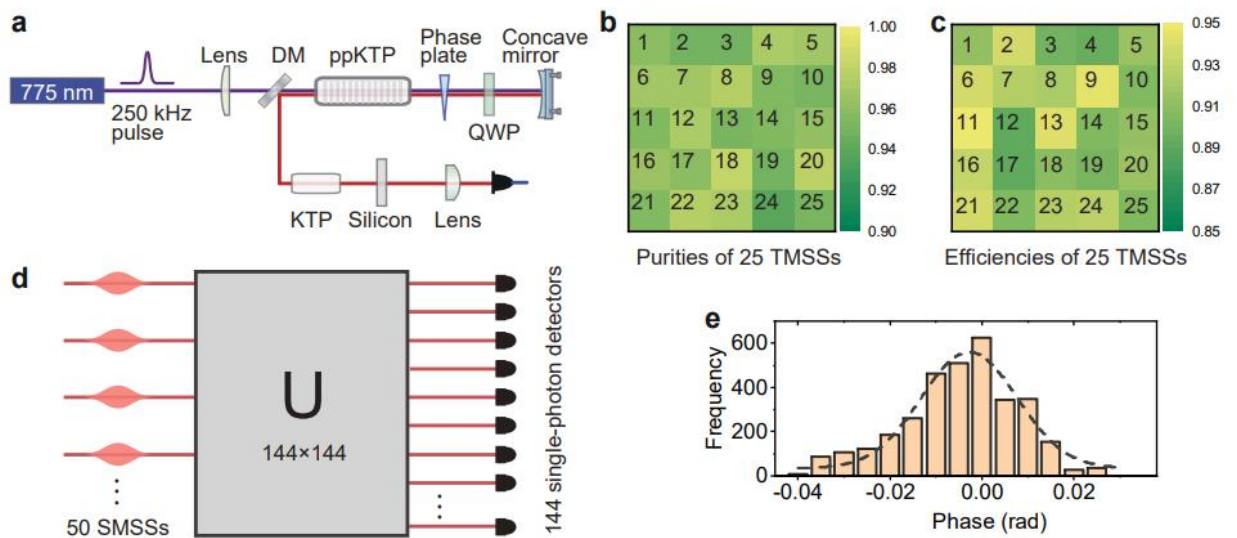


Рис.4 Ключевые экспериментальные параметры. (а) Усиление сжатого света путем стимулированного параметрического преобразования с понижением. Как фотоны накачки, так и параметрические фотоны перефокусируются вогнутым зеркалом обратно на ppKTP для стимулированного излучения. Преобразованные вниз фотоны подвергаются поляризационному обмену с помощью QWP, а их относительная фаза со светом накачки настраивается с помощью клиновидной фазовой пластины. Сжатый свет прошел кристалл KTP для компенсации двулучепреломления и кремниевую пластину с просветляющим покрытием для фильтрации остаточного света накачки, собранную перед использованием в одно-модовое оптоволокно. **(б)** Чистота 25 сжатых источников света в среднем составляет 0,961. **(с)** Эффективность сбора 25 сжатых источников света в среднем составляет 0,918. **(д)** Обзор настройки ВГБ. 25 пар двухрежимных сжатых фотонов отправляются в 144-режим интерферометра, и распределение выходных данных считывается 144 однофотонными детекторами. **(е)** фазовая стабильность всей установки. Гистограмма показывает, что колебания фазы находятся в пределах $\lambda/100$ в течение часа.

Оба эксперимента, нацеленных на улучшение стабильности устройства оптического квантового компьютера, проводятся на установках с дискретными элементами, что делает их крайне чувствительными ко внешним вибрациям. Однако в патенте Акчурина Г.Г. предлагается устройство волоконно-оптического квантового компьютера, не нуждающегося в поддержании сверхнизких температур и обладающего устойчивостью к сильным внешним вибрациям.

3. Волоконно-оптический квантовый компьютер.

3.1 Волоконно-оптический квантовый компьютер на $2N$ интерферометрах Маха-Цандера

По первому варианту устройство оптического квантового компьютера с N кубитами, включающее лазер, генерирующий в ближней инфракрасной области, нелинейный кристалл, выполненный с возможностью формирования на выходе кристалла оптического пучка бифотонов, обладающих квантовой запутанностью, установленный на пути пучка бифотонов оптический разветвитель на N оптических каналов, квантовый регистр, состоящий из N фазовых электро-оптических модуляторов, управляемых с цифрового компьютера, выходы которых оптически связаны со входом квантового процессора, состоящего из $2N$ оптических линейных многоканальных интерферометров Маха-Цандера, оптические выходы интерферометров соединены с однофотонными лавинными фотодиодами, выходы которых подключены к управляющему цифровому компьютеру, согласно решению, дополнительно содержит второй идентичный первому квантовый регистр и второй квантовый процессор, состоящий из $2N$ оптических линейных многоканальных интерферометров Маха-Цандера, при этом интерферометры процессора выполнены на оптических одномодовых волокнах, оптические выходы интерферометров соединены с однофотонными лавинными фотодиодами, выходы которых подключены к управляющему цифровому компьютеру, в качестве лазера выбирают инжекционный одночастотный полупроводниковый лазер с системой стабилизации выходной мощности и температуры лазерного кристалла, в качестве нелинейного кристалла выбран анизотропный отрицательный нелинейный кристалл, съюстированный в неколлинеарной оптической схеме с возможностью формирования из пучка бифотонов двух пространственно разнесенных оптических пучков бифотонов, два микрообъектива для ввода оптических пучков бифотонов в два идентичных волоконно-оптических канала на одномодовых волокнах, разветвитель выполнен волоконным и соединен с электро-оптическими модуляторами, представляющими собой интегральные амплитудно-фазовые электро-оптические модуляторы, на выходе которых установлена оптическая система из четверть волновой и полуволновой пластин и поляризатора в каждом канале квантового регистра для управления поляризацией бифотонов, а оптический квантовый процессор состоит из $2N$ линейных многоканальных волоконно-оптических интерферометров Маха-Цандера, состоящих из одномодовых изотропных оптических волокон, а однофотонные лавинные фотодиоды содержат время-цифровые преобразователи, подключенные к

управляющему цифровому компьютеру, содержащим электронную схему N совпадений для каждой пары двух сопряженных фотодетекторов [23].

3.2 Волоконно-оптический квантовый компьютер на $2N$ интерферометрах Саньяка.

По второму варианту оптический квантовый компьютер, включающий лазер, генерирующий в ближней инфракрасной области, нелинейный кристалл, выполненный с возможностью формирования на выходе оптического пучка бифотонов, обладающих квантовой запутанностью, установленный на пути пучка бифотонов оптический разветвитель на N оптических каналов, квантовый регистр, состоящий из N фазовых электро-оптических модуляторов, управляемых с цифрового компьютера, выходы которых оптически связаны со входом квантового процессора, включающего многоканальный оптический интерферометр, оптические выходы интерферометра соединены с однофотонными фотодетекторами, выходы которых подключены к управляющему цифровому компьютеру, согласно решению, дополнительно содержит второй идентичный первому квантовый регистр и второй квантовый процессор, при этом оба квантовых процессора представляют собой одномодовые волоконно-оптические интерферометры Саньяка одинаковой длины, на выходе каждого квантового регистра установлен волоконно-оптический смеситель с N каналов на один канал, на выходе каждого волоконного интерферометра Саньяка установлен акусто-оптический пространственный модулятор света на N оптических пучков (каналов), которые оптически смешиваются с помощью оптических зеркал на $2N$ однофотонных лавинных фотодиодах, содержащих время-цифровые преобразователи, подключенные к цифровому компьютеру.

3.3. Схемы Волоконно-оптических квантовых компьютеров.

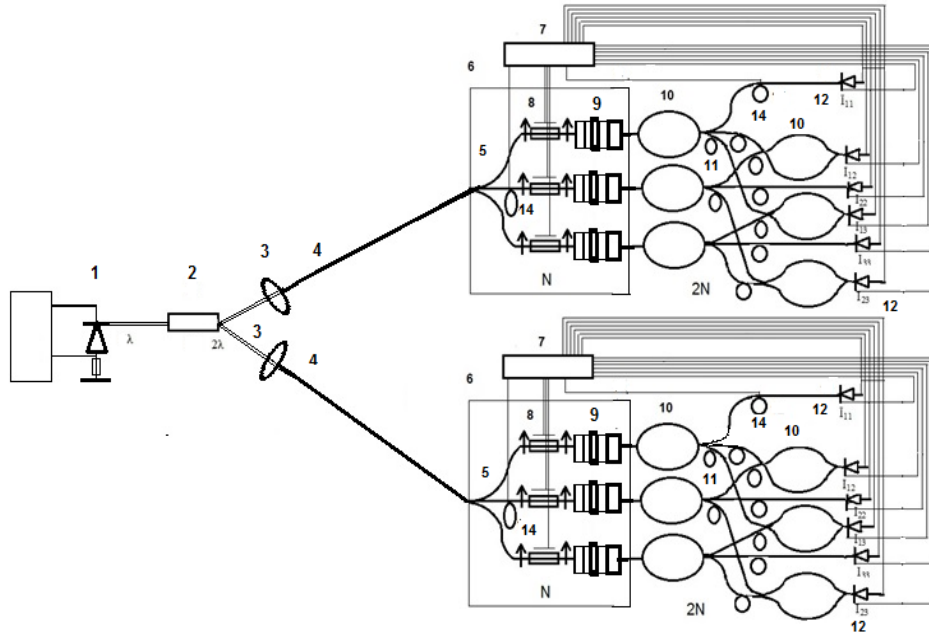


Рис. 5. Блок-схема волоконно-оптического квантового компьютера по первому варианту.

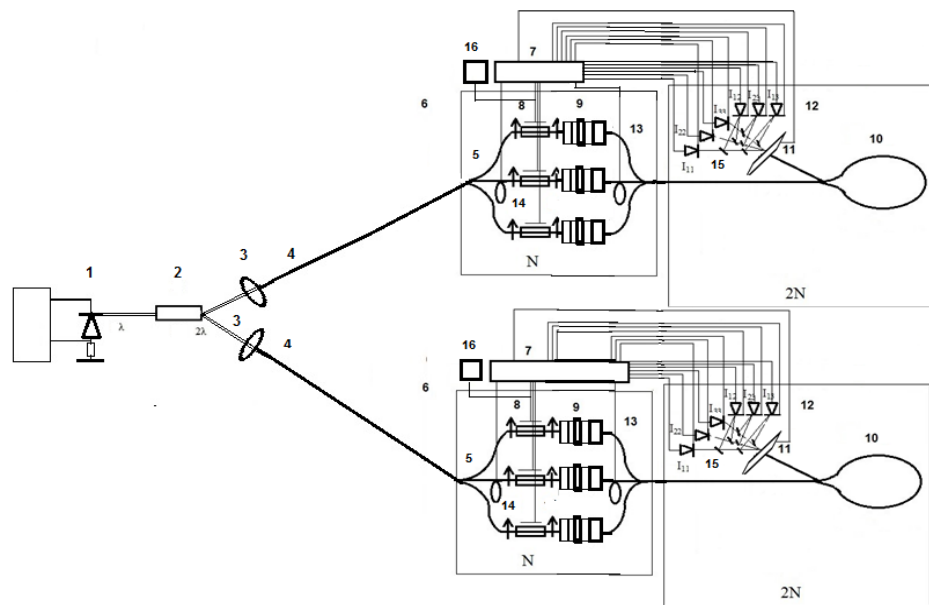


Рис. 6. Блок-схема волоконно-оптического квантового компьютера по второму варианту.

На Рис.5 представлена блок-схема волоконно-оптического квантового компьютера по первому варианту; на Рис. 6 - блок-схема волоконно-оптического квантового компьютера по второму варианту:

Позициями на чертежах обозначены:

- 1 – одночастотный инжекционный полупроводниковый лазер;
- 2- нелинейный одноосный кристалл;
- 3 - микробиоъектив;
- 4 - два идентичных волоконно-оптических канала на одномодовых волокнах ;

- 5 - волоконный одномодовый разветвитель на N каналов;
- 6 - квантовый регистр;
- 7 - цифровой компьютер;
- 8 - амплитудно-фазовый электро-оптический модулятор;
- 9 - поляризационная система, состоящая из четвертьволновой и полуволновой фазовых пластин и поляроида;
- 10 - волоконно-оптический интерферометр;
- 11 - акусто-оптический дефлектор;
- 12 - однофотонный лавинный фотодиод;
- 13 - одномодовый волоконно-оптический смеситель;
- 14 - волоконный фазовый корректор;
- 15 - оптические зеркала.
- 16 - СВЧ синтезатор

Оба варианта устройства интегральны. Подобные схемы с интерферометрами применяются в военной авиации и обладают сильной устойчивостью к внешним вибрациям и к скручиванию. Вместе с этим предложенные варианты не требуют охлаждения до сверхнизких температур. В совокупности это делает их оптимальным квантовым компьютером на сегодняшний день, с большими перспективами в применении.

Заключение

Проведен обзор методов создания квантовых компьютеров, включая квантовые компьютеры на нейтральных атомах в ридберговских состояниях, на сверхпроводящих джозефсоновских полупроводниковых структурах.

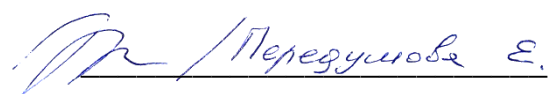
Предложен вариант волоконно-оптического квантового компьютера на одномодовом оптическом волокне при лазерном возбуждении на частоте ω (одночастотном) при генерации двух пространственно-разнесенных оптических пучков фотонов в запутанных состояниях на частоте $\omega/2$ за счет параметрического рассеяния в анизотропном кристалле.

Впервые показана возможность создания запутанных N-кубитов, с помощью одномодовых волоконных малошумящих интерферометров Маха-Цандера или интерферометров Саньяка.

Список использованной литературы

1. Р. Фейнман «Моделирование физики на компьютерах», сборник «Квантовый компьютер и квантовые вычисления» 1999, Вып.2, С. 53-95.
2. Ю. И. Манин «Вычислимое и невычислимое», М. Сов. Радио, 1980, С. 128.
3. К. А. Валиев, А. А. Кокин, «Квантовые компьютеры: надежды и реальность», Регулярная и хаотическая динамика (РХД), 2001, С. 350.
4. Д.Н. Клышко, «Фотоны и нелинейная оптика», Гл. ред. Физ.-мат., 1980.
5. Фроловцев Д. Н., Магницкий С. А., Дёмина А. В. «Методика измерения поляризационно- запутанных состояний бифотонов с помощью квантового томографа, Измерительная техника, 2021, С. 21–27.
6. Валиев К. А. «Квантовая информатика: компьютеры, связь и криптография. Вестник российской академии наук.» Т. 70. № 8. С. 688-695.
7. М. Нильсен, И. Чанг, «Квантовые вычисления и квантовая информация», Мир, 2009, С. 347-349
8. Р. Фейнман «Моделирование физики на компьютерах», сборник «Квантовый компьютер и квантовые вычисления», Вып.2, 1999, С. 53-95.
9. Э.Стин, «Квантовые вычисления», РХД, 2000, 111стр.
10. Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер, «Физика квантовой информации», Постмаркет, 2002, С. 375.
11. M. Saffman. J. Phys. B «Quantum computing with atomic qubits and Rydberg interactions: Progress and challenges», At. Mol. Opt. Phys., 2016, С. 1-27.
12. Л. К. Гровер. «Квантовая механика помогает найти иголку в стоге сена», сборник «Квантовый компьютер и квантовые вычисления», вып.2, 1980, С.101-109
13. А. Ю. Китаев «Квантовые вычисления: алгоритмы и исправление ошибок», УМН, т.52, вып.6 (318), 1996, С. 54-111.
14. Mikhail D Lukin et al. «Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator. Nature», 2017, С. 1-7.
15. Loïc Henriët, Lucas Beguin, Adrien Signoles, «QUANTUM COMPUTING WITH NEUTRAL ATOMS», Quantum, 2020., С. 2-6.
16. Philip Krantz, Morten Kjaergaard, Fei Yan, Terry P. Orlando, Simon Gustavsson, William D. Oliver. A Quantum Engineer's to Superconducting Guide Qubits. Applied Physics Reviews 6, 021318 (2019) (<https://doi.org/10.1063/1.508955>).

17. YulinWu, Wan-SuBao, Jian-WeiPan et.al. Strong Quantum Computational Advantage Using Superconducting Quantum Processor. PHYSICAL REVIEW LETTERS, 127, 180501 (2021)
18. R. Barends, A. Shabani, L. Lamata et al., Nature 534, 222, 2016.
19. Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng, «Quantum computational advantage using photons», Science, 2020, С. 1-8.
20. Han-Sen Zhong, Yu-Hao Deng, Jian-Wei Pan, Phase-Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light. Physical Review, 2021, С. 1-9.
21. Tim van Leent, Matthias Bock, Florian Fertig «Entangling single atoms over 33 km telecom fiber», Nature, 607, 2022 С. 71-73.
22. Курочкин В.Л. и др. Автометрия 2015, 51 т. 6. с.17-22
23. Акчурин Г.Г. «Волоконно-оптический квантовый компьютер (варианты)», патент, RU 2 813708 С1 Jge,k/15.02.2024 Бюл.
24. Фроловцев Д. Н., Магницкий С. А., Дёмин А. В. Методика измерения поляризационно-запутанных состояний бифотонов с помощью квантового томографа // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 21–27.
25. Paul-Antoine Moreau, Ermes Toninelli, Thomas Gregory, «Imaging Bell-type non local behavior», 2019, 5, С.1-9.
26. А. Л. Чуанг и др. «Экспериментальная реализация квантового алгоритма», сборник «Квантовый компьютер и квантовые вычисления» вып.2, 1999, стр.130 — 140.
27. D. Loss. D. DiVincenzo «Quantum Computation with Quantum Dots», Physical Review, v.A57, N1, 1998, С.120-126.
28. Окоши Т., К. Окамото, М. Оцу, Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1990, С. 30-62.
29. А. Т. Klimov, I. G. Neizvestny, S. P. Suprun, V. N. Shumsky. Medium for interaction between two qubits in quantum computatios. Quantum computer and quantum computing. vol.2,N2,pp.79-84, (2001).

Передурова Е.